

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

На правах рукопису

ІЛЬЧЕНКО МИКОЛА ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 528.563

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ**

05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин

ДИСЕРТАЦІЯ
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий консультант
д т н., проф.,
Заслужений діяч науки
і техніки України
О.М. Безвесільна

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Ільченко М.В. Методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – «Методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» м. Київ, 2020.

У дисертаційній роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Розроблено нові методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;
2. Проведено розробку математичних моделей основних компонентів та каналів управління приладової системи стабілізації;
3. Визначено шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів шляхом:
 - застосування нових твердотільних гіроскопів з більшою смугою пропускання, замість традиційних електромеханічних гіротахometrів,
 - підвищення частоти інформаційного обміну,
 - застосування нової моделі побудови стабілізатора;
4. Уперше розроблено метод усунення відводів вертикального та горизонтального каналів наведення у режимі функціонування стабілізатора із підвищеною точністю (режим «УПР»);
5. Розроблено нову модель побудови стабілізатора підвищеної точності;
6. Розроблено метод компенсації взаємовпливу горизонтального та вертикального каналів один на одного за рахунок введення додаткових електронних налаштувальних коефіцієнтів;
7. Уперше проведено математичне моделювання щодо визначення методу вимірювання динамічної похибки стабілізації.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновано методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;
2. Розроблено математичні моделі основних компонентів та каналів управління приладової системи, що дозволило провести моделювання окремих режимів роботи;
3. Розроблено та підтверджено математичним моделюванням шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів шляхом:
 - застосування твердотільних гіротахometrів із смугою пропускання не менше 100 Гц замість традиційних електромеханічних гіротахometrів,
 - підвищення частоти інформаційного обміну з 400 Гц до 1000 Гц,
 - зміни моделі побудови стабілізатора – заміна «залежної» стабілізації на «незалежну» стабілізацію з використанням у контурі управління приладу із стабілізованим полем зору;
4. Розроблено та підтверджено методом математичного моделювання правильність запропонованого методу усунення відводів вертикального та горизонтального каналів наведення у режимі функціонування з підвищеною точністю (режим «УПР»);
5. Визначено функціональну модель цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації підвищеної точності з використанням нових чутливих елементів та приладу спостереження за об'єктами із стабілізованим полем зору;
6. Розроблено метод електронної виставки датчиків кутової швидкості, що враховує похибки його виставки та усуває взаємний вплив каналів без застосування трудомістких ручних операцій;
7. Розроблено та впроваджено у виробництво метод вимірювання похибки цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, що дозволяє:
 - проводити вимірювання на етапах налаштування, пред'явницьких та

приймально-здавальних випробувань приладової системи стабілізації без виконання трудомістких робіт,

- підвищити якість перевірок одного з основних технічних параметрів приладової системи – точності стабілізації.

У вступі проаналізовано літературні джерела у сфері існуючих приладових комплексів вимірювання механічних параметрів та стабілізації, обґрунтовано актуальність досліджень, можливість та доцільність використання запропонованих методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. Сформульовано мету, завдання, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено основні наукові та практичні результати, які отримано у дисертаційній роботі. Представлено дані про публікації та апробацію результатів дослідження, наведено дані про особистий внесок здобувача, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Визначено структуру та обсяг дисертаційної роботи. Наведено принцип дії сучасних цифрових приладових систем. Розглянуто існуючі методики вимірювання похибок механічних параметрів та стабілізації.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела у сфері існуючих приладових комплексів вимірювання механічних параметрів та стабілізації. Наведено відомості щодо призначення та побудови стабілізаторів. Визначено схему різновидів стабілізаторів та основні конструктивні елементи стабілізаторів. Визначено основні показники якості стабілізаторів. Наведено результати аналізу можливих шляхів підвищення точнісних характеристик. Наведено аналітичний огляд вимірювання похибок стабілізації.

У другому розділі розглянуто методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. Обґрунтовано застосування нових твердотільних гіротахometrів замість електромеханічних гіротахometrів. Проведено роботи з математичного моделювання з метою вивчення можливості покращення характеристик точності приладового комплексу стабілізатора шляхом збільшення смуги пропускання до

100 Гц та зменшення частоти інформаційного обміну до 1000 Гц. Проведено розрахунки за допомогою математичного моделювання щодо усунення відводів вертикального та горизонтального каналів у режимі функціонування стабілізатора з підвищеною точністю. Розглянуто можливість підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації за рахунок зміни моделі побудови стабілізатора. Запропоновано перейти від «залежної» системи до «незалежної» за рахунок введення до складу контурів управління стабілізатора приладу з стабілізованим полем зору.

У третьому розділі наведено розроблені математичні моделі основних вузлів та блоків, що входять до складу стабілізатора: пульта керування, гіротахометра ГТ46, датчика положення, блоку управління та ін. Отримано математичні моделі каналів вертикального та горизонтального наведення з редуктором і двигуном. Отримано математичні моделі аналогового і цифрового тракту управління каналів горизонтального та вертикального наведення. Наведено результати математичного моделювання окремих режимів управління вертикального та горизонтального каналу. Розроблено математичні моделі, які, використовуються при моделюванні режимів управління стабілізатора, а також у дослідженні зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення його точності.

У четвертому розділі дисертації наведено відомості про практичні розробки та результати експериментальних досліджень стабілізатора. Запропоновано методи і засоби проведення вимірювань при експериментальних дослідженнях; підтверджено достовірність основних технічних характеристик приладової системи стабілізації. Наведено результати моделювання основних режимів роботи стабілізатора з цифровими контурами управління приводами горизонтального і вертикального наведення. Проведено експериментальні роботи щодо визначення характеристик приводних двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20. Проведено експериментальні дослідження та дослідження за допомогою математичного моделювання щодо визначення смути пропускання

електромеханічних гіротахometrів ГТ46. Досліджено зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності стабілізатора. За результатами математичного моделювання проведено розрахунки методу оцінки динамічної похибки стабілізації.

У п'ятому розділі наведено новий метод вимірювання динамічної похибки стабілізації. За матеріалами математичного моделювання визначено: точку подачі синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ до контуру управління стабілізатором, параметри синусоїдального сигналу та наведено метод і результати експериментального відпрацювання на атестованому стенді СТМ02 та навчальному комплексі УК675. Результатами проведених робіт підтверджено значення динамічної похибки стабілізації ≤ 2 т.д.

У загальних висновках сформульовано основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, які представлено у дисертаційній роботі. Головний науковий результат дисертаційної роботи полягає у розробці методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, що досягнуто шляхом заміни приладового складу системи на прилади, які розроблено з використанням сучасної елементної бази і переходом на нову модель побудови стабілізатора. Такий результат досягнуто одночасно з запропонованим переходом від «залежного» принципу стабілізації на «незалежну» стабілізацію з використанням у контурі управління стабілізатора приладу з стабілізованим полем зору.

Ключові слова: стабілізатор, механічні параметри, система стабілізації, динамічна похибка стабілізації

Список публікацій здобувача:

Статті у фахових виданнях:

1. Bezvesilna O. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers / O.Bezvesilna, O.Petrenko, V.Halytskyi, M.Ilchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system. – Kharkiv. – 2020. – №1/9(103). – PP. 39 – 45.

2. Петренко О.В. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею

Коріюлісового вібраційного гіроскопа / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». — Луцький національний технічний університет, Луцьк. — 2019. — №14. — С. 103 – 108.

3. Безвесільна О.М. Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького технічного університету. Технічні науки — Хмельницький. — 2019. — №4(275). — С. 169 – 175.

4. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, С.О. Нечай // Вісник інженерної академії України. — 2017. — №4. — С. 89 – 92.

5. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки — Хмельницький національний університет, Хмельницький. — 2019. — №3(273). — С. 158 – 163.

6. Безвесільна О.М. Вибір робочого діапазону кутів тахометра для виробів легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. — 2019. — №2(69). — С. 21 – 25.

Інші наукові видання:

7. Безвесільна О.М. Оцінка впливу конструкції кронштейну для установки приладів ГТ46, ГТ46-01 на їх вихідні сигнали / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — 2019. — №7 (71) — С. 1– 5.

8. Безвесільна О.М. Дослідження можливості підвищення рівномірності вихідної характеристики тахометра / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — 2019. — № 8 (72).— С. 149–152.

9. Безвесільна О.М. Визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахометрів / О.М. Безвесільна О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». — 2019. — № 9(73). — С. 219–226.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

10. Безвесільна О.М. Підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, Ю.В. Киричук // XIV Міжнар. наук.-практ. конф. «Наукова думка інформаційного віку 2018» (Польща, Пшемишль. – 07–15.03.2018). – С. 3–8.

11. Безвесільна О.М. Призначення та основні характеристики стабілізатора / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко // Всеукраїнська наук.-практ. on-line конф. «Технічні науки на сучасному етапі», (Україна, Житомир. – 16-18.05.2018). – С. 107,108;

12. Безвесільна О.М. Усунення взаємовпливу каналів вертикального та горизонтального наведення в виробках легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // XII Міжнар. наук.-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси 2019» (Україна, Київ. – 21–22 травня 2019). – С. 262 – 264;

13. Безвесільна О.М. Заміна електроприводів наведення у БМП-1 на електропривод СВУ-500-10Р / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // I Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси», (Україна, Черкаси, 29-31 травня 2019). – С. 92 – 94;

14. Безвесільна О.М. Випробування енкодера для використання у гіроскопічних приладах / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнар. наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 40), (Україна, Тернопіль, 09.07.2019). – С. 767 – 769;

15. Безвесільна О.М. Розширення відмов стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Наук. практ. конф. «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій». (Україна, Ужгород, 28–29 червня 2019). – С. 44 – 49.

16. Петренко О.В. Автоматичне налаштування стабілізаторів / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнар. наук.-практ. конф. «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien». Частина 3. (Австрія, Відень, 23

серпня 2019). – С. 44 – 46.

17. Петренко О.В. Модернізація та продовження строку служби комплексу приладів управління / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // VII Міжнар. конф. «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», (Україна, Київ, 9–10 жовтня 2019). – С. 570 – 572.

ANNOTATION

Pichenko M.V. Methods and means of improving the precision characteristics of an instrument system for measuring mechanical parameters and stabilization. – Manuscript.

Theses for obtaining a scientific degree of the candidate of technical sciences in specialty 05.11.01 - instruments and methods of measuring mechanical quantities. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2020.

The research presented in the dissertation allowed to solve a topical and complex scientific and technical problem, which is important - improving the accuracy of the instrument system for measuring mechanical parameters (angle of sensors of angular velocity, stiffness, backlash, torque resistance and other). stabilization in extreme operating conditions (a wide range of external vibration and temperature perturbations).

The following new results were obtained.

1. New methods and means of increasing the accuracy characteristics of the instrument system for measuring mechanical parameters and stabilization have been developed.

The comparative analysis, using mathematical modeling methods, confirmed the feasibility of using solid speed gyrotachometers as angular velocity sensors, due to higher bandwidth and increased frequency of information exchange, which in turn reduces errors and improves the characteristics of stabilizers.

2. Development of mathematical models of the main components and control

channels of the instrument stabilization system was carried out, which allowed modeling of separate modes of operation of the stabilizer.

3. The ways of increase of accuracy of digital system of measurement of mechanical parameters and stabilization by: mathematical modeling and experimental working off are defined and confirmed by:

- use of solid gyro tachometers with a bandwidth of at least 100 Hz instead of traditional electromechanical gyro tachometers,
- increasing the frequency of information exchange from 400 Hz to 1000 Hz,
- changes in the model of construction of the stabilizer - replacement of "dependent" stabilization by "independent" stabilization using in the control circuit of the device with a stabilized field of view.

4. Developed and confirmed by the method of mathematical modeling the correctness of the proposed method of eliminating the taps of the vertical and horizontal guidance channels that are in the mode of operation with high accuracy (mode "UPR").

5. The functional model of the digital system of measurement of mechanical parameters and stabilization of the increased accuracy with use of new sensitive elements and the device of supervision over the purpose with the stabilized field of vision is defined. The proposed model of stabilizer construction will increase the accuracy of stabilization and reduce the requirements for measuring the dynamic stabilization error of 2 etc. up to 0.5 etc.

6. Developed methods for measuring mechanical parameters that affect the functioning of the stabilizer:

- electronic exhibition of angular velocity sensors, which takes into account the errors of their exhibition, and eliminates the interaction of the horizontal channel on the vertical channel and vice versa without the use of time-consuming manual operations;
- method of measuring the moments of resistance to rotation, which is performed by measuring the current consumption of the tower and the armament unit and comparing them with the limit values for each of the channels;

- method of measuring the stiffness of vertical and horizontal guidance channels;
- method of measuring the backlash of the drives on the motor control branches.

7. Developed and implemented in production a method of measuring the dynamic stabilization error, which is determined by the results of testing the stabilizer sinusoidal signal $A = 2.5^\circ \sin \omega t$, which allows:

- to carry out measurements at the stages of adjustment, bearer and acceptance tests of the instrument stabilization system without performing time-consuming tests in the conditions of the landfill;
- to improve the quality of inspections of one of the main technical parameters of the instrument system - the accuracy of stabilization.

The developed method does not require additional refinement of the material part of the stabilizer and is implemented by changing the software and algorithms.

The introduction analyzes the literature in the field of existing instrumentation systems for measuring mechanical parameters and stabilization, substantiates the relevance of research, the possibility and feasibility of using the proposed methods and tools to improve the accuracy of the instrumentation system for measuring mechanical parameters and stabilization. The purpose, tasks, scientific novelty and practical significance of the obtained results are formulated. The main scientific and practical results obtained in the dissertation are presented. Data on publications and approbation of research results are presented, data on the personal contribution of the applicant are given, the connection of work with scientific programs, plans, themes is shown. The structure and volume of the dissertation are determined. The principle of operation of modern digital instrument systems is given. The existing methods of measuring errors of mechanical parameters and stabilization are considered.

The first section analyzes the literature sources in the field of existing instrumentation systems for measuring mechanical parameters and stabilization. Information on the purpose and structure of stabilizers is given. The scheme of types of stabilizers and the main structural elements of stabilizers are determined. The main indicators of quality of stabilizers are determined. The results of the analysis of possible ways to increase the accuracy characteristics are presented. An analytical

review of the measurement of stabilization errors is given.

The second section The second section considers methods and means of improving the accuracy characteristics of the instrument system for measuring mechanical parameters of stabilization. The use of new solid-state gyrotachometers instead of electromechanical gyrotachometers is substantiated. Mathematical modeling works were carried out in order to study the possibility of improving the accuracy characteristics of the instrument complex of the stabilizer by increasing the bandwidth to 100 Hz and reducing the frequency of information exchange to 1000 Hz. Calculations were made with the help of mathematical modeling to eliminate the branches of the vertical and horizontal channels in the mode of operation of the stabilizer with increased accuracy. The possibility of increasing the accuracy characteristics of the instrumental system for measuring mechanical parameters and stabilization by changing the model of stabilizer construction is considered. It is proposed to move from a "dependent" system to an "independent" due to the introduction of the control circuits of the stabilizer of the device with a stabilized field of view.

The third section presents the developed mathematical models of the main components and units that are part of the stabilizer: control panel, gyrotachometer GT46, position sensor, control unit, etc. Mathematical models of the armament unit and turret with gearbox and motor are obtained. A mathematical model of analog and digital control path of the horizontal guidance channel is obtained; vertical guidance channel; results of mathematical modeling of control modes: for vertical channel, for horizontal channel. Mathematical models have been developed, which are used in modeling the stabilizer control modes, as well as in the study of changes in the circuit-technical solution of the weapon stabilizer in order to increase its accuracy.

The fourth section of the dissertation provides information on practical developments and results of experimental studies of weapon stabilizers. The technique and means of carrying out measurements at experimental researches are offered; the reliability of the main technical characteristics of the instrument stabilization system is confirmed. The results of modeling the main modes of operation of the stabilizer with

digital control circuits of the drives of the horizontal and vertical guidance of the weapon unit are presented. Experimental works to determine the characteristics of drive motors EDM20M, EDM02, EDM20. Experimental researches and researches by means of mathematical modeling on definition of a bandwidth of electromechanical gyrotachometers GT46 are carried out. Changes in the circuit-technical solution of the weapon stabilizer in order to increase the accuracy of the stabilizer have been studied. Based on the results of mathematical modeling, calculations of the method of estimating the dynamic stabilization error were performed.

The fifth section provides materials for the development and implementation of a method for measuring the dynamic stabilization error. Based on the materials of mathematical modeling, the point of supply of the sinusoidal signal to the control circuit of the stabilizer is determined, the parameters of the sinusoidal signal are determined, the method and results of experimental testing on the certified stand STM02 and training complex UK675 are given. The results of the performed works confirmed the value of the dynamic stabilization error ≥ 2 etc.

In general conclusions the main results of theoretical and experimental researches presented in the dissertation work are formulated. The main scientific result of the dissertation is to develop methods and tools to improve the accuracy of the instrument system for measuring mechanical parameters and stabilization, which is achieved by replacing the instrumentation of the system with devices developed using modern element base on new circuit design principles. This result was achieved simultaneously with the proposed transition from the "dependent" principle of stabilization to "independent" stabilization using in the control circuit of the stabilizer of the device with a stabilized field of view.

Keywords: instrument complex, mechanical value, sensing element, stabilization system.

List of main publications of the applicant:

1. Bezvesilna O. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers / O.Bezvesilna, O.Petrenko, V.Halytskyi, M.Ilchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and

controlling system. – Kharkiv. – 2020. – №1/9(103). – PP. 39 – 45.

2. Петренко О.В. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею Коріолісового вібраційного гіроскопа / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». — Луцький національний технічний університет, Луцьк. – 2019. – №14. – С. 103 – 108.

3. Безвесільна О.М. Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького технічного університету. Технічні науки – Хмельницький. – 2019. – №4(275). – С. 169 – 175.

4. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, С.О. Нечай // Вісник інженерної академії України. – 2017. – №4. – С. 89 – 92.

5. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – Хмельницький національний університет, Хмельницький. – 2019. – №3(273). – С. 158 – 163.

6. Безвесільна О.М. Вибір робочого діапазону кутів тахометра для виробів легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2019. – №2(69). – С. 21 – 25.

7. Безвесільна О.М. Оцінка впливу конструкції кронштейну для установки приладів ГТ46, ГТ46-01 на їх вихідні сигнали / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – №7 (71) – С. 1– 5.

8. Безвесільна О.М. Дослідження можливості підвищення рівномірності вихідної характеристики тахометра / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – № 8 (72).– С. 149–152.

9. Безвесільна О.М. Визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахометрів / О.М. Безвесільна О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – № 9(73). – С. 219–226.

10. Безвесільна О.М. Підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, Ю.В. Киричук // XIV Міжнар. наук.-практ. конф. «Наукова думка інформаційного віку 2018» (Польща, Пшемишль. – 07–15.03.2018). – С. 3–8.

11. Безвесільна О.М. Призначення та основні характеристики стабілізатора / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко // Всеукраїнська наук.-практ. on-line конф. «Технічні науки на сучасному етапі», (Україна, Житомир. – 16-18.05.2018). – С. 107,108;

12. Безвесільна О.М. Усунення взаємовпливу каналів вертикального та горизонтального наведення в виробках легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // XII Міжнар. наук.-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси 2019» (Україна, Київ. – 21–22 травня 2019). – С. 262 – 264;

13. Безвесільна О.М. Заміна електроприводів наведення у БМП-1 на електропривод СВУ-500-10Р / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // I Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси», (Україна, Черкаси, 29-31 травня 2019). – С. 92 – 94;

14. Безвесільна О.М. Випробування енкодера для використання у гіроскопічних приладах / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнар. наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 40), (Україна, Тернопіль, 09.07.2019). – С. 767 – 769;

15. Безвесільна О.М. Розширення відмов стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Наук. практ. конф. «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій». (Україна, Ужгород, 28–29 червня 2019). – С. 44 – 49.

16. Петренко О.В. Автоматичне налаштування стабілізаторів / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнар. наук.-практ. конф. «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien». Частина 3. (Австрія, Відень, 23 серпня 2019). – С. 44 – 46.

17. Петренко О.В. Модернізація та продовження строку служби комплексу приладів управління / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // VII Міжнар. конф. «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», (Україна, Київ, 9–10 жовтня 2019). – С. 570 – 572.

ЗМІСТ

	Стор.
АНОТАЦІЯ.....	2
ANNOTATION.....	9
СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	22
ВСТУП.....	26
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ У ГАЛУЗІ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ СТАБІЛІЗАЦІЇ.....	42
1.1. Аналітичний огляд літератури у галузі існуючих прила- дових комплексів стабілізації.....	42
1.2. Класифікація та побудова стабілізаторів.....	44
1.3. Принцип дії стабілізатора.....	48
1.4. Основні показники якості стабілізатора.....	52
1.5. Аналітичний огляд літератури у галузі методів вимірювання похибок стабілізації.....	54
1.5.1. Схема електрична функціональна приладу ПС.....	59
1.5.2. Визначення срединної похибки та часу нестабілізованого стану.....	62
Висновки до розділу 1.....	63
Список літератури до розділу 1.....	63
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНІСНИХ ХРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ.....	66
2.1. Застосування твердотільних гіроскопів замість електромеханічних гіротахometrів ГТ46.....	66
2.2. Підвищення смуги пропускання та частоти інформаційного	74

обміну.....	
2.3. Підвищення швидкодії за рахунок покращення технічних характеристик приладового складу стабілізатора.....	77
2.4. Застосування нової моделі побудови стабілізатора.....	79
2.5. Удосконалення методів вимірювання механічних параметрів, що впливають на функціонування стабілізатора.....	91
2.5.1. Розробка методу вимірювання моментів опору обертання виробу.....	91
2.5.2. Розробка методу усунення взаємовпливу датчиків кутової швидкості каналу ВН на канал ГН.....	93
2.5.3. Розробка методу вимірювання жорсткості стабілізатора.....	94
Висновки до розділу 2.....	97
Список літератури до розділу 2.....	98
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ ТА КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ.....	101
3.1. Математичні моделі основних вузлів та блоків стабілізатора.	101
3.2. Математичні моделі горизонтального та вертикального каналів стабілізатора.....	114
3.3. Аналогові та цифрові математичні моделі горизонтального і вертикального каналів	123
3.4. Використання математичних моделей стабілізатора при моделюванні режимів управління.....	127
3.5. Підвищення точнісних параметрів стабілізатора в режимі «УПР».....	127
3.5.1. Похідні данні для проведення математичного моделювання по введенню режиму «УПР-1».....	128
3.5.2. Результати моделювання.....	133
3.5.3. Результати експериментального відпрацювання приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації в	

режимі «УПР» при наявності підрежиму «УПР-1».....	139
Висновки до розділу 3.....	143
Список літератури до розділу 3.....	142
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ.....	145
4.1. Експериментальні дослідження двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20 за оцінкою електромагнітної та електромеханічної постійних часу.....	145
4.1.1. Обсяг досліджень двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ЕЛ. МАГН}}$	145
4.1.2. Обсяг досліджень двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ЕЛ. МЕХ}}$	146
4.1.3. Результати досліджень двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ЕЛ. МАГН}}$	147
4.1.4. Результати досліджень двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ЕЛ. МЕХ}}$	149
4.2. Експериментальне визначення смуги пропускання гіротахометра ГТ46.....	150
4.3. Дослідження зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності.....	159
4.3.1. Результати досліджень щодо впровадження нових ДКШ.....	161
4.3.2. Результати досліджень впливу смуги пропускання.....	164
4.3.3. Моделювання зміни дискретності обчислення сигналів керування з КВГ.....	166
4.4. Вибір методу оцінки динамічної похибки стабілізації.....	169
4.4.1. Результати моделювання.....	174
Висновки до розділу 4.....	176
Список літератури до розділу 4.....	178
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ СТАБІЛІЗАЦІЇ.....	181
5.1. Аналіз літературних даних та постановка задачі.....	181

5.2.	Мета та завдання дослідження розробки та впровадження методу вимірювання динамічної похибки стабілізації.....	183
5.3.	Основна частина методу визначення динамічної похибки стабілізації.....	184
5.3.1.	Початкові вимоги.....	184
5.3.2.	Визначення точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора.....	185
5.3.3.	Визначення значень основних параметрів синусоїдального сигналу $A=2,5^{\circ}\sin\omega t$ щодо механічних характеристик стенду СТМ02 та комплексу УК675.....	186
5.3.3.1.	Задання збурюючої кутової швидкості ω_z	186
5.3.3.2.	Фіксація сигналів сумарної швидкості ω_{Σ}	188
5.3.3.3.	Розрахунок динамічних похибок.....	188
5.3.3.4.	Визначення значення крутості $K\omega$	188
5.3.3.5.	Результати випробувань щодо відпрацювання динамічної похибки стабілізації.....	190
	Висновки до розділу 5.....	195
	Список літератури до розділу 5.....	196
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	199
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	201
	ДОДАТКИ.....	210
Додаток А	Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	211
Додаток Б	Фото стабілізатора з Коріолісовими вібраційними гіроскопами (КВГ).....	214
Додаток В	Фото Коріолісових вібраційних гіроскопів встановлених при випробуваннях у різних виробках.....	215
Додаток Г	Фото статей, присвячених приладовому комплексу стабілізації.....	216

Додаток Д

Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	218
--	-----

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

БКД	— блок керування двигуном
БУ	— блок управління
БО	— блок наведення вертикального каналу
Б	— блок наведення горизонтального каналу
ВН	— вертикальне наведення
ВОГ	— волоконно-оптичний гіроскоп
ГН	— горизонтальне наведення
ГТ	— гіротахометр
«ГТ»	— режим роботи стабілізатора на ручній гільці управління
ДК (ДУ)	— датчик кута
ДКШ	— датчик кутової швидкості
ДН	— датчик напруги
ДП	— датчик положення
ДС	— датчик струму
ЕДМ	— електродвигун
ЕМ	— електромагнітна муфта
І	— інтегратор
ІС	— інтегратор струму
КВГ	— Коріолісовий вібраційний гіроскоп
КП	— ключовий пристрій
КПА	— контрольно-перевірочна апаратура
КС	— комплекс стабілізації
ЛК	— ланка корекції
МЕМС	— мікромеханічний твердотільний гіроскоп
МК	— масштабний коефіцієнт
МП	— мікропроцесор
МПБ	— механізм поворота горизонтального каналу

МПО	– механізм підйому вертикального каналу
ОЕМ	– оптико-електронний модуль
ОЕМ-СД	– оптико-електронний модуль з стабілізованим дзеркалом
ОЕМ-СПЗ	– оптико-електронний модуль з стабілізованим полем зору
ОКП	– обертовий контактний пристрій
ОТ	– обертовий трансформатор
«АВТ»	– режим наведення з швидкостями до 6 °/с
«ПАВ»	– режим наведення з підвищеними швидкостями
ПАЗ	– програмно-алгоритмічне забезпечення
ПАЦ	– пристрій аналогово-цифровий
ПГР	– пристрій гальванічної розв'язки
ПК	– приладовий комплекс
ПН	– підсилювач напруги
ПП	– підсилювач потужності
ППр	– прилад приведення
ППС	– підсилювач підсумовувач
ПСД (ПСЗ)	– прилад з стабілізованим дзеркалом (полем зору)
ПУ-К(О)	– пульти управління стабілізатором
ПЦВ	– прилад обзору місцевості
РКС	– режим контролю струму
Виріб	– рухомий об'єкт
СЛВ	– стабілізована лінія візування поля зору
СУВ	– система управління виробом
СН	– система навігації
СП	– статичний перетворювач
СС	– система стабілізації
СТМ02	– атестований стенд для проведення випробувань
СЧНВ	– середній час напрацювання на відмову
УК675	– учбовий комплекс УК675
«УПР»	– режим функціонування модуля з підвищеною точністю

«УПР-1»	– режим функціонування модуля без впливу відводів
ФВЧ	– фільтр високих частот
ФЖ	– фільтр живлення
ФНЧ	– фільтр низьких частот
ФЧВ	– фазочутливий випрямляч (демодулятор)
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач
ЧЕ	– чутливий елемент
ШИМ	– широтно-імпульсний модулятор
1 т.д.	– 1 тисячна дистанції = 3,6 кут. хв. = 10^{-3} рад
RS422, RS485	– цифрові інтерфейсні лінії зв'язку
Р.Ч.	– технологічного реле часу
СВУ-500-4Ц	– цифровий стабілізатор з гіротахометрами ГТ46
СВУ-500-7Ц	– цифровий стабілізатор з гіроскопами КВГ
$K_{ГТ}$	– статичний коефіцієнт передачі
H	– кінетичний момент
ζ	– відносний коефіцієнт демпфірування
q	– кутова частота вільних коливань
λ	– частота загасаючих коливань
γ	– коефіцієнт затухання перехідного процесу
G_{BH}	– жорсткість каналу вертикального наведення
$G_{ГН}$	– жорсткість каналу горизонтального наведення
θ	– амплітуда середньої похибки стабілізації
F	– фокусна відстань об'єктива кіноапарата
A_{cp}	– відхилення кривої точності по кожному кадру щодо середньої лінії
k	– кратність збільшення об'єктива дешифратора
n	– кількість відхилень від середньої лінії по інтервалам
Σni	– сумарна кількість відхилень від середньої лінії по інтервалам
$A_{ГН}$	– процент часу нестабілізованого стану каналу ГН

$A_{гн}$	–	процент часу нестабілізованого стану каналу ВН
Δ_n	–	різниця показань індикатора в розподілах шкали
$M_{г}$	–	гіроскопічний момент гіротахометра
M_{α}	–	момент, що враховує вплив гістерезису
$M_{д}$	–	момент дебаланса гіротахометра
$C_{т}$	–	жорсткість торсіону гіротахометра
I_n	–	момент інерції підвісу гіротахометра
$T_{я}$	–	постійна часу якоря двигуна
$C_{м}$	–	постійну моменту навантаження на вал двигуна

ВСТУП

Сучасний стан вітчизняного виробництва приладових систем стабілізації характеризується значним підвищенням вимог до точності, швидкодії, вимірюванню механічних параметрів (кута виставлення ДКШ, жорсткості, люфтів, моментів опору обертанню та інших) при експлуатації у складних умовах. В умовах сучасного політичного та економічного стану України роботи по підвищенню безпеки держави є надзвичайно актуальними. Одна з таких актуальних задач – задача підвищення точності вітчизняних приладових систем вимірювання механічних параметрів та стабілізації і вимірювання похибки стабілізації.

Стан вітчизняного виробництва приладових систем вимірювання механічних параметрів та стабілізації характеризується стрімким переходом:

- від застарілої елементної бази з використанням транзисторів, резисторів, діодів - на нову перспективну цифрову мікропроцесорну з використанням перепрограмованих мікропроцесорів;

- від аналогових ліній зв'язку, що зазнають вплив дії завад, - на цифрові завадостійкі лінії зв'язку;

- від оптичних засобів спостереження за об'єктами на місцевості - на оптико-електронні з виводом відеозображення на сучасні монітори;

- від світлодіодної інформації - на інформацію, що відображається на цифрових дисплеях;

- від електромеханічних чутливих сенсорів первинної інформації - на твердотільні чутливі сенсори і та ін.

Науково-технічний прогрес у галузі удосконалення компонентів елементної бази та розвитку цифрової техніки приніс суттєві зміни у схемо-технічні рішення побудови стабілізаторів, покращення їх тактико-технічних характеристик. Розроблені та впроваджені нові цифрові стабілізатори значно полегшують роботу операторів (навідників), але й вони не завжди можуть ефективно виконувати поставлені перед ними завдання.

Перспективні розробки, дослідження та впровадження нових удосконалених приладових систем вимірювання механічних параметрів та стабілізації є запорукою збереження і зростання науково-виробничого потенціалу України. Тому, є актуальною науково-технічною проблемою.

Науково-технічний прогрес у галузі приладових систем стабілізації потребує удосконалення компонентів, елементної бази системи керування, використання сучасних кутомірних засобів для покращення тактико-технічних характеристик стабілізаторів (точності стабілізації, швидкодії).

Розв'язання даної складної науково-технічної задачі вимагає застосування нової більш досконалої приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації з застосуванням нової елементної бази і використанням нових твердотільних прецизійних чутливих елементів мікромеханічних гіроскопів (МЕМС), Коріолісових вібраційних гіроскопів (КВГ) та волоконо-оптичних гіроскопів (ВОГ).

Забезпечення підвищення точності приладової системи вимірювання механічних величин та стабілізації є найважливішою проблемою сучасності, вирішення якої забезпечує безпеку України.

Актуальність теми

Надзвичайно актуальні роботи, які присвячені підвищенню безпеки держави. Актуальними науково-технічними питаннями, що вирішується у роботі, є дослідження методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації (кута виставлення ДКШ, жорсткості, люфтів, моментів опору обертанню та інших). Тому тема дисертаційної роботи «Методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації» є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження та розробки, узагальнені у роботі, виконувались у рамках

відповідних науково-дослідних робіт між кафедрою приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України з підприємством Публічне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики»:

– тема № 2803-ф «Теорія й принципи побудови сучасного обчислювального інтегрального діагностичного комплексу із застосуванням нанотехнологій і нейронних мереж» (номер державної реєстрації 0105U001085, 2004-2005р.): здобувачеві належить розділ 6, в якому розглянуто застосування нейронних мереж для обробки двовимірної вимірювальної інформації про параметри руху об'єкту;

– тема № 21 «Дослідження нового динамічно настроюваного гіроскопа для прецизійних навігаційних систем» (номер державної реєстрації 0209U 002127, 2007-2009р.): здобувачеві належить розділ 2, в якому наведено опис конструкції та принцип дії ДНГ;

– тема № 2411-ф «Науково-теоретичні дослідження нової прецизійної інерціальної навігаційної системи в екстремальних умовах з використанням нейронних мереж» (номер державної реєстрації 0111U 000714, 2011-2013р.): здобувачеві належить розділ 4, в якому наведено принципові схеми та рівняння руху систем стабілізації та навігації нової СІН;

– тема №2019 «Система керування навігаційного комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих машин» (номер державної реєстрації 0117U000405, 2017 р.): здобувачеві належать розділи 2-5, в яких наведено аналіз сучасного стану проблеми, функціональна схема та принцип дії системи керування НК стабілізатора озброєння, розділ 8, в якому наведено опис, основні компоненти та характеристики стабілізаторів озброєння для легких броньованих машин та згідно планів науково-технічної ради Публічного акціонерного товариства «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики».

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є вирішення важливої наукової задачі, що полягає у визначенні методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, покращення основних характеристик стабілізаторів (підвищення точності вимірювання механічних величин) в екстремальних умовах роботи (широкий діапазон зовнішніх вібраційних і температурних збурень). шляхом використання запропонованих нових прецизійних методів та засобів.

Основні задачі:

- провести аналітичний огляд літератури та обґрунтувати актуальність досліджень та розробок у галузі шляхів підвищення точності та методів і засобів вимірювання похибки стабілізації;
- надати опис роботи сучасних стабілізаторів. Провести теоретичний аналіз приладового складу в частині шляхів підвищення точності та швидкодії окремих приладів;
- розробити математичні моделі основних компонентів вузлів, блоків та каналів управління стабілізатора. Навести математичні моделі основних складових вузлів, блоків та каналів управління;
- провести розрахунково – моделюючі роботи на основі розробленої математичної моделі стабілізатора з визначення методів підвищення точності та динамічних характеристик стабілізаторів;
- провести експериментальні дослідження щодо визначених шляхів підвищення точності стабілізації;
- дослідити основні технічні характеристики нових перспективних твердотільних чутливих елементів;
- розробити нову модель побудови стабілізатора підвищеної точності.
- розробити метод вимірювання динамічної похибки стабілізації.

Об'єкт досліджень дисертації - процес вимірювання механічних величин приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації шляхом використання запропонованих методів та засобів.

Предмет дослідження: - методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації.

Методи дослідження:

- аналіз науково-технічної літератури, патентних баз даних та в мережі Internet в частині принципів побудови стабілізаторів, засобів та методів підвищення точнісних характеристик, методики визначення динамічної похибки стабілізації (розділ 1, 2);

- математичне моделювання, яке включає в себе розробку математичних моделей блоків, вузлів стабілізатора та основних режимів його роботи (розділ 3);

- оптимізація параметрів стабілізатора для вимірювання механічних параметрів та стабілізації (розділ 2);

- оцінка швидкодії окремих складових стабілізатора (розділ 2),

- оцінка правильності вибору методу виміру динамічної похибки стабілізації, тобто методу виміру кутових відхилень стабілізованого горизонтального та вертикального каналів від заданного напрямку (розділ 4,5);

- експериментальні дослідження результатів аналітичних розрахунків та результатів математичного моделювання (розділ 4);

- статистична обробка даних експериментальних досліджень (визначення параметрів руху РО на інтервалі часу) (розділ 2,4);

Галузь використання

Висновки дисертаційної роботи «Методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації» використовуються при модернізації дійсних та при розробці нових стабілізаторів.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Розроблено нові методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;
2. Проведено розробку математичних моделей основних компонентів та каналів управління приладової системи стабілізації;
3. Визначено шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів шляхом:
 - застосування нових твердотільних гіроскопів з більшою смугою пропускання, замість традиційних електромеханічних гіротахometrів,
 - підвищення частоти інформаційного обміну,
 - застосування нової моделі побудови стабілізатора;
4. Уперше розроблено метод усунення відводів вертикального та горизонтального каналів наведення у режимі функціонування стабілізатора із підвищеною точністю (режим «УПР»);
5. Розроблено нову модель побудови стабілізатора підвищеної точності;
6. Розроблено метод компенсації взаємовпливу горизонтального та вертикального каналів один на одного за рахунок введення додаткових електронних налаштувальних коефіцієнтів;
7. Уперше проведено математичне моделювання щодо визначення методу вимірювання динамічної похибки стабілізації.

Практичне значення отриманих результатів

1. Запропоновано методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;
2. Розроблено математичні моделі основних компонентів та каналів управління приладової системи, що дозволило провести моделювання окремих режимів роботи стабілізатора;
3. Розроблено та підтверджено математичним моделюванням шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів шляхом:

- заміни електромеханічних гіротахometrів на твердотільні гіротахometrи із смугою пропускання не менше 100 Гц;
- підвищення частоти інформаційного обміну до 1000 Гц,
- зміни моделі побудови стабілізатора – заміна «залежної» стабілізації на «незалежну» стабілізацію з використанням у контурі управління приладу із стабілізованим полем зору;

4. Підтверджено методом математичного моделювання правильність запропонованого методу усунення відводів вертикального та горизонтального каналів наведення у режимі функціонування з підвищеною точністю (режим «УПР»);

5. Визначено функціональну модель цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації підвищеної точності з використанням нових чутливих елементів та приладу спостереження за об'єктами із стабілізованим полем зору;

6. Розроблено методи електронної виставки датчиків кутової швидкості, що враховує похибки його виставки та усуває взаємний вплив каналів без застосування трудомістких ручних операцій;

7. Розроблено та впроваджено у виробництво метод вимірювання похибки цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, що дозволяє:

- проводити вимірювання на етапах налаштування, пред'явницьких та приймально-здавальних випробувань приладової системи стабілізації без виконання трудомістких робіт,
- підвищити якість перевірок одного з основних технічних параметрів приладової системи – точності стабілізації.

Особистий внесок здобувача.

Особисто автором виконано аналіз літературних даних за темою досліджень, плануванні та проведенні експериментів, обробці експериментальних даних та апробації отриманих наукових результатів на наукових конференціях.

Автором було вперше розроблено та відпрацьовано на експериментальному обладнанні методику вимірювання динамічної похибки стабілізації яку було впроваджено у виробництво, проведено експериментальні дослідження по визначенню смуги пропускання електромеханічних гіротахometrів, електромагнітних та електромеханічних постійних привідних двигунів, обґрунтовано необхідність переходу від «залежного» до «незалежного» принципу схемо-технічної побудови стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки з використанням у контурі управління стабілізатора приладу спостереження за ціллю з стабілізованим полем зору, розроблені блок схеми, структурно-функціональні схеми побудови такого стабілізатора. Його технічні характеристики наведені у порівнянні з характеристиками сучасного цифрового стабілізатора, який розроблено на твердотільних гіротахометрах. Обґрунтовано запропоновані методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. Розроблено методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації на підставі розроблених математичних моделей, проведено математичне моделювання методу усунення відводів у режимі функціонування стабілізатора з підвищеною точністю. Автором запропоновано нові методики по вимірюванню механічних параметрів каналів наведення, що спрощують відомі методики.

За темою дисертації опубліковано такі наукові праці

1. Bezvesilna O. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers / O.Bezvesilna, O.Petrenko, V.Halytskyi, M.Ilchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system. – Kharkiv. – 2020. – №1/9(103). – PP. 39 – 45.

Здобувачем запропоновано методику визначення динамічної похибки цифрових стабілізаторів озброєння.

2. Петренко О.В. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею Коріолісового вібраційного гіроскопа / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Збірник

наукових праць «Перспективні технології та прилади». — Луцький національний технічний університет, Луцьк. — 2019. — №14. — С. 103 – 108.

Здобувачем надано основні параметри п'єзодатчиків та проведено розрахунок співвідношення між напругами на виході від напруги, яка подається на вхід п'єзодатчиків.

3. Безвесільна О.М. Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького технічного університету. Технічні науки – Хмельницький. — 2019. — №4(275). — С. 169 – 175.

Здобувачем побудовано Simulink-модель КВГ, який працює в якості датчика кута.

4. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, С.О. Нечай // Вісник інженерної академії України. — 2017. — №4. — С. 89 – 92.

Здобувачем проведено аналіз результатів математичного моделювання та опис результатів дослідження.

5. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – Хмельницький національний університет, Хмельницький. — 2019. — №3(273). — С. 158 – 163.

Здобувачем проведено оцінку впливу полоси пропускання та дискретності обчислювальних операцій виробів ГТ-46, КВГ, МЕМС та ВОГ на точності характеристики системи стабілізації.

6. Безвесільна О.М. Вибір робочого діапазону кутів тахометра для виробів легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. — 2019. — №2(69). — С. 21 – 25.

Здобувачем проведено аналіз вихідних характеристик та визначено робочий діапазон кутів тахометра.

Інші наукові видання:

7. Безвесільна О.М. Оцінка впливу конструкції кронштейну для установки приладів ГТ46, ГТ46-01 на їх вихідні сигнали / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – №7 (71) – С. 1– 5.

Здобувачем проведено аналіз та опис результатів дослідження.

8. Безвесільна О.М. Дослідження можливості підвищення рівномірності вихідної характеристики тахометра / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – № 8 (72).– С. 149–152.

Здобувачем проведено аналіз результатів та опис результатів дослідження.

9. Безвесільна О.В. Визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахометрів / О.М. Безвесільна О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – № 9(73). – С. 219–226.

Здобувачем проведено аналіз результатів математичного моделювання та опис результатів дослідження.

Апробація результатів дисертаційної роботи

Викладені у дисертаційній роботі результати досліджень доповідалися, обговорювалися і одержали схвалення на міжнародних та загальнодержавних науково-практичних конференціях:

10. Безвесільна О.М. Підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, Ю.В. Киричук // XIV Міжнар. наук.-прак. конф. «Наукова думка інформаційного віку 2018» (Польща, Пшемишль. – 07–15.03.2018). – С. 3–8.

Здобувачем запропоновано шляхи підвищення точності стабілізаторів озброєння.

11. Безвесільна О.М. Призначення та основні характеристики стабілізатора / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко // Всеукраїнська наук.-прак. on-line конф. «Технічні науки на сучасному етапі», (Україна, Житомир. – 16-18.05.2018).

– С. 107,108;

Здобувачем наведено основні технічні характеристики та призначення стабілізаторів озброєння.

12. Безвесільна О.М. Усунення взаємовпливу каналів вертикального та горизонтального наведення в виробках легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // XII Міжнар. наук.-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси 2019» (Україна, Київ. – 21–22 травня 2019). – С. 262 – 264;

Здобувачем запропоновано методику усунення взаємовпливу каналів введенням додаткових налаштувальних коефіцієнтів, що дозволяє уникнути трудомістких ручних операцій.

13. Безвесільна О.М. Заміна електроприводів наведення у БМП-1 на електропривод СВУ-500-10Р / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // I Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси», (Україна, Черкаси, 29-31 травня 2019). – С. 92 – 94;

Здобувачем запропоновано замінити аналоговий електропривод, який було розроблено у 80-х роках минулого сторіччя на сучасний цифровий СВУ-500-10Р.

14. Безвесільна О.М. Випробування енкодера для використання у гіроскопічних приладах / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнар. наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 40), (Україна, Тернопіль, 09.07.2019). – С. 767 – 769;

Здобувачем запропоновано у гіроскопічних датчиках кутової швидкості замість аналогових датчиків кута використовувати сучасні цифрові датчики кута – енкодери.

15. Безвесільна О.М. Розширення відмов стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Наук. практ. конф. «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій». (Україна, Ужгород, 28–29 червня 2019). – С. 44 – 49.

Здобувачем запропоновано за рахунок доробки програмного забезпечення

розширити кількість параметрів стабілізатора за якими проводиться діагностичні перевірки правильності функціонування.

16. Петренко О.В. Автоматичне налаштування стабілізаторів / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнар. наук.-практ. конф. «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien». Частина 3. (Австрія, Відень, 23 серпня 2019). – С. 44 – 46.

Здобувачем запропоновано за рахунок доробки програмного забезпечення розробити додаткову підпрограму яка у автоматичному режимі буде самостійно без втручання оператора проводити налаштування стабілізатора.

17. Петренко О.В. Модернізація та продовження строку служби комплексу приладів управління / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // VII Міжнар. конф. «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», (Україна, Київ, 9–10 жовтня 2019). – С. 570 – 572.

Здобувачем запропоновано методику продовження строку служби приладів управління.

Впровадження результатів роботи

Результати досліджень впроваджено у теоретичні і практичні здобутки на підприємствах УКРОБОРОНПРОМу, ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» та у навчальному процесі кафедри приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при проведенні лекційних, лабораторних та практичних занять із навчальних дисциплін «Перетворювачі фізичних величин», «Основи наукових досліджень» (дод. А)

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів

Достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій підтверджено вибором апробованих методів досліджень, цифровим моделюванням на ЕОМ, збігом результатів експериментів з відомими експериментальними даними інших

досліджень, відповідністю отриманих теоретичних та експериментальних результатів.

Публікації

За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, із них 6 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті у інших виданнях, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Роботу викладено на 209 сторінках основного друкованого тексту. Повний обсяг дисертаційної роботи 220 сторінки друкованого тексту, містить 115 рисунків, 17 таблиць, 5 додатків. Список використаних джерел по розділах становить: розділ 1 – 15 джерел, розділ 2 – 18 джерел, розділ 3 – 17 джерел, розділ 4 – 22 джерел, розділ 5 – 16 джерел.

У вступі проаналізовано літературні джерела у сфері існуючих приладових комплексів вимірювання механічних параметрів та стабілізації, обґрунтовано актуальність досліджень, можливість та доцільність використання запропонованих методів та засобів підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. Сформульовано мету, завдання, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено основні наукові та практичні результати, які отримано у дисертаційній роботі. Представлено дані про публікації та апробацію результатів дослідження, наведено дані про особистий внесок здобувача, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Визначено структуру та обсяг дисертаційної роботи. Наведено принцип дії сучасних цифрових приладових систем. Розглянуто існуючі методики вимірювання

похибок механічних параметрів та стабілізації.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела у сфері існуючих приладових комплексів вимірювання механічних параметрів та стабілізації. Наведено відомості щодо призначення та побудови стабілізаторів. Визначено схему різновидів стабілізаторів та основні конструктивні елементи стабілізаторів. Визначено основні показники якості стабілізаторів. Наведено результати аналізу можливих шляхів підвищення точнісних характеристик. Наведено аналітичний огляд вимірювання похибок стабілізації.

У другому розділі розглянуто методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів стабілізації. Обґрунтовано застосування нових твердотільних гіротахometrів замість електромеханічних гіротахometrів. Проведено роботи з математичного моделювання з метою вивчення можливості покращення характеристик точності приладового комплексу стабілізатора шляхом збільшення смуги пропускання до 100 Гц та зменшення частоти інформаційного обміну до 1000 Гц. Проведено розрахунки за допомогою математичного моделювання щодо усунення відводів вертикального та горизонтального каналів у режимі функціонування стабілізатора з підвищеною точністю. Розглянуто можливість підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації за рахунок зміни моделі побудови стабілізатора. Запропоновано перейти від «залежної» системи до «незалежної» за рахунок введення до складу контурів управління стабілізатора приладу з стабілізованим полем зору.

У третьому розділі наведено розроблені математичні моделі основних вузлів та блоків, що входять до складу стабілізатора: пульта керування, гіротахometrа ГТ46, датчика положення, блоку управління та ін. Отримано математичні моделі каналів вертикального та горизонтального наведення з редуктором і двигуном. Отримано математичні моделі аналогового і цифрового тракту управління каналів горизонтального та вертикального наведення. Наведено результати математичного моделювання окремих режимів управління

вертикального та горизонтального каналу. Розроблено математичні моделі, які, використовуються при моделюванні режимів управління стабілізатора, а також у дослідженні зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення його точності.

У четвертому розділі дисертації наведено відомості про практичні розробки та результати експериментальних досліджень стабілізатора. Запропоновано методи і засоби проведення вимірювань при експериментальних дослідженнях; підтверджено достовірність основних технічних характеристик приладової системи стабілізації. Наведено результати моделювання основних режимів роботи стабілізатора з цифровими контурами управління приводами горизонтального і вертикального наведення. Проведено експериментальні роботи щодо визначення характеристик приводних двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20. Проведено експериментальні дослідження та дослідження за допомогою математичного моделювання щодо визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахometrів ГТ46. Досліджено зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності стабілізатора. За результатами математичного моделювання проведено розрахунки методу оцінки динамічної похибки стабілізації.

У п'ятому розділі наведено новий метод вимірювання динамічної похибки стабілізації. За матеріалами математичного моделювання визначено: точку подачі синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ до контуру управління стабілізатором, параметри синусоїдального сигналу та наведено метод і результати експериментального відпрацювання на атестованому стенді СТМ02 та навчальному комплексі УК675. Результатами проведених робіт підтверджено значення динамічної похибки стабілізації ≤ 2 т.д.

У загальних висновках сформульовано основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, які представлені у дисертаційній роботі.

У додатках представлені: акти впровадження результатів дисертації; фото стабілізатора з Коріолісовими вібраційними гіроскопами (КВГ), фото

Коріолісових вібраційних гіроскопів, які встановлені у різних виробках при випробуваннях.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ У ГАЛУЗІ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ СТАБІЛІЗАЦІЇ

Мета даного розділу провести аналітичний огляд літератури у галузі шляхів підвищення точності стабілізації та методів вимірювання динамічної похибки стабілізації.

Аналіз літературних джерел, в тому числі джерел з мережі Internet, з даної тематики обмежується лише загальними технічними характеристиками окремих типів стабілізаторів не розкриваючи в достатньому вигляді принципів їх побудови, функціонування, шляхів підвищення точності стабілізації та методик вимірювання похибок стабілізації.

1.1. Аналітичний огляд літератури у галузі існуючих приладових комплексів стабілізації

Характерною рисою розвитку сучасної техніки є покращення технічних характеристик всіх приладових комплексів, які входять до складу системи управління виробом, в тому числі і стабілізаторів.

Цей процес обумовлений переходом на цифрову елементну базу, використанням нових сенсорів інформації, нових оптико-електронних приладів обзору місцевості та розробкою нових схемо-технічних рішень побудови техніки, що, в свою чергу, підвищує рівень швидкодії техніки її маневреність за рахунок більшого рівня автоматизації управління.

З іншого боку, вимоги до точності, швидкодії систем управління та стабілізації, постійно підвищуються, що потребує їх удосконалення.

При цьому необхідно враховувати, що сучасні рухомі об'єкти мають значно більші швидкості, на них діють значно більші перевантаження та неконтрольовані механічні збурення (удари, вібрації) таблиця 1.1 [1].

Таблиця 1.1

Середні параметри коливань корпусу танків при русі по середнє-пересіченій місцевості зі швидкістю до 20 км/год

Види коливань	Кутові коливання		
	Амплітуда	Швидкість	Частота, Гц
Продольні	2,5°	8,25 %/с	1,1 Гц
Горизонтальні	1,2°	1,6 %/с	0,6 Гц
Поперечні	1,8°	6.3 %/с	0,8 Гц

Тому, вимоги до точності засобів та методів вимірювання визначених вище механічних величин стабілізаторів стали значно вищими.

Науково-технічний прогрес у галузі приладових комплексів вимірювання механічних величин та стабілізації потребує удосконалення компонентів, елементної бази системи керування, використання сучасних цифрових приладів вимірювання кутових швидкостей для покращення тактико-технічних характеристик стабілізаторів, які мають прийти на заміну аналоговим приладам.

Аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів [2] показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів не має. Тому вимоги до точності засобів та методів вимірювання визначених вище механічних величин стабілізаторів стали значно вищими.

Досягнення високої точності таких комплексів стало можливим завдяки високій якості сучасних елементів гіроскопічної техніки і значного розвитку теорії гіроскопічних пристроїв, що розроблені Криловим А.Н., Булгаковим Б.А., Ішлінським О.Ю., Ройтенбергом Я.М., Рівкіним С.С., Павловим В.А., Поповим Є.Г., Лур'є А.І., Солодовніков В.В. та ін. Теорії лінійних і нелінійних систем наведення були розроблені Солодовніковим В.В., Чемодановим Б.К., Лакотой Н.А. Теорія цифрових слідкуючих приводів розроблена Бесекерським В.А., Федоровим С.М. Теорія гіроскопічних систем стабілізації розроблена Павловським М.А., Пельпором Д.З., Одинцовим А.О., Самотокіним Б.Б.,

Бубликом Г.Ф., Безвесільною О.М., Збруцьким О.В., Рижковим Л.М., Бондарем П.М., Ривкіним С.С., Ройтенбергом Я.Н., Фабрикантом Е.А., Сайдовим П.І. Теорія оптимальних систем керування – Беллманом Р., Полянським В.Г. Граммером Р., Гостьовим В.І., Єськовим Д.І. та інш. [1,2].

Однак, у літературі недостатньо робіт присвячених стабілізаторам, у яких було б вирішено задачі підвищення точності, швидкодії; зміни моделі побудови стабілізаторів з метою підвищення точності; вимірюванню однієї з точностних характеристик стабілізатора – динамічної похибки стабілізації; усунення самовідводів каналів, що виникають за рахунок некомпенсованих нульових сигналів датчика кутової швидкості (ДКШ); удосконаленню методу вимірювання механічних параметрів, які впливають на точнісні характеристики стабілізатора.

Рішення зазначених задач становить предмет дослідження даної роботи.

1.2. Класифікація та побудова стабілізаторів

У багатьох наукових виданнях та учбових посібниках наводяться окремі напрямки принципів побудови та класифікації стабілізаторів [1,3]. Для правильного розуміння принципів побудови наведемо основні принципи їх класифікації (рис. 1.1):



Рис. 1.1. Класифікація стабілізаторів

1) **за об'єктом стабілізації** – це об'єкт, положення якого стабілізується:

- стабілізатори головних приладів,
- стабілізатори додаткових приладів,
- стабілізатори спеціальних приладів;

2) **за кількістю площин стабілізації:**

- одноплоскостні (стабілізатори тільки в одній, як правило, вертикальній площині),
- двоплоскостні (стабілізатори у двох, вертикальній та горизонтальній, площинах),
- трьохплоскостні (стабілізатори у вертикальній, горизонтальній площинах та по куту крену);

3) **за видом вимірюваної координати:**

- позиційні (стабілізатори такого типу запам'ятовують задане положення (позицію) та вимірюють кутове відхилення горизонтального та вертикального каналів від заданого положення гіроскопічними датчиками кута);

4) **за функцією гіроскопа:**

- силові (з стабілізуючим моментом достатнім для стабілізації об'єкта),
- індикаторні (з гіроскопічним приладом, що виконує функцію індикатора відхилення),
- швидкісні (стабілізатори такого типу вимірюють тільки абсолютну кутову швидкість переміщення об'єкта, який стабілізується, за допомогою гіроскопічних датчиків абсолютної кутової швидкості - гіротахometrів);

5) **по типу виконавчого приводу:**

- електромашинні (з стабілізуючим моментом, що створює електричний двигун),
- гідравлічні (використовують стабілізуючий момент, що створює гідропривід);

6) **по типу регулювання:**

- по відхиленню,
- по збуренню,

– комбіновані;

7) по типу схеми - технічного виконання:

- аналогові (виконані на транзисторах, резисторах, діодах),
- цифрові (виконані на цифрових мікропроцесорах з можливістю проведення перепрограмування без апаратного доопрацювання апаратури),
- комбіновані (в яких присутні цифрові та аналогові елементи схем).

Крім того, є ще окремий тип – стабілізатори поля зору, які поділяються на стабілізатори з:

– спільною стабілізацією (або «залежною»), в яких блок, що стабілізується жорстко чи через кінематику пов'язано, з приладом спостереження за місцевістю,

– автономною стабілізацією (або «незалежною»), в яких до складу системи управління виробом (СУВ) вводиться прилад з стабілізованим полем зору (СПЗ) або стабілізованою лінією візування (СЛВ).

Стабілізатори, в тому числі і стабілізатори СВУ-500, як об'єкти автоматичного регулювання [4], побудовані за класичною схемою, що включає в себе об'єкт регулювання та регулятор (рис. 1.2.).



Рис.1.2. Функціональна схема каналу стабілізатора

Виходячи зі схеми рис.1.2, розглянемо, як основні елементи цієї схеми знайшли своє відображення у структурній схемі цифрової приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації на рис. 1.3.

Сигнал $U_{\text{сигн.}}$ – сигнал з сенсорів інформації для приладового комплексу стабілізації. Це сигнал з датчиків кутової швидкості по каналу вертикального

усунення розузгодження між заданим положенням та поточним положенням об'єкта стабілізації.

Сигнал U_{oc} – сигнал зворотного зв'язку по струму або напрузі. У стабілізаторі (рис. 1.3) одночасно використовуються обидва сигнали по струму та напрузі.

На підставі наведеного вище, робимо висновок, що *регулятор* – це комплекс приладів, датчиків та механізмів, що працює за заданою програмою та автоматично компенсує механічні впливи на об'єкт регулювання. *Об'єкти регулювання* – це механізми (блок наведення по каналу ВН та блок наведення по каналу ГН), в яких постійно регулюються вихідні характеристики $Z_{вих}$.

1.3. Принцип дії стабілізатора

Стабілізатор складається з двох незалежних один від одного каналів горизонтального та вертикального наведення [5,6]. Для зручності розглянуто роботу сукупності приладів і функціональних вузлів, що забезпечують стабілізацію й наведення у вертикальній та горизонтальній площинах, роздільно та поіменовано їх «привід ВН» та «привід ГН», відповідно.

Привід ВН (рис. 1.4). Основними елементами (рис. 1.4), що забезпечують роботу привода ВН, є: датчик кутової швидкості ДКШ-ВН, пульти керування командира ПУ К та оператора ПУ О, блок керування двигуном вертикального каналу БКД ВН, до складу якого входять підсилювач потужності ПП, датчики струму ДС та напруги ДН; механізм підйому МПД із електродвигуном ЕДМ-ВН, блок управління БУ, до складу якого входить фазочутливий випрямляч ФЧВ1, а також цифрові пристрої: інтегратор І, підсумовуючі підсилювачі ППС1-ППС3, підсилювач вихідного сигналу ПН і широтно-імпульсний модулятор ШІМ.

При русі виробу вісь чутливості вертикального каналу разом з корпусом відхиляється від вихідного положення.

Разом із вісью чутливості вертикального каналу відхиляється ДКШ-ВН, який установлений у вертикальній площині стабілізації, ДКШ-ВН виробляє сигнал, який пропорційний величині швидкості та відповідний (по фазі)

напрямку відхилення вісі чутливості у вертикальній площині. Сигнал із ДКШ-ВН надходить на вхід інтегратора.

Інтегратор виробляє сигнал, який пропорційний інтегралу швидкості, що відповідає величині кута відхилення БО від вихідного положення (помилка стабілізації).

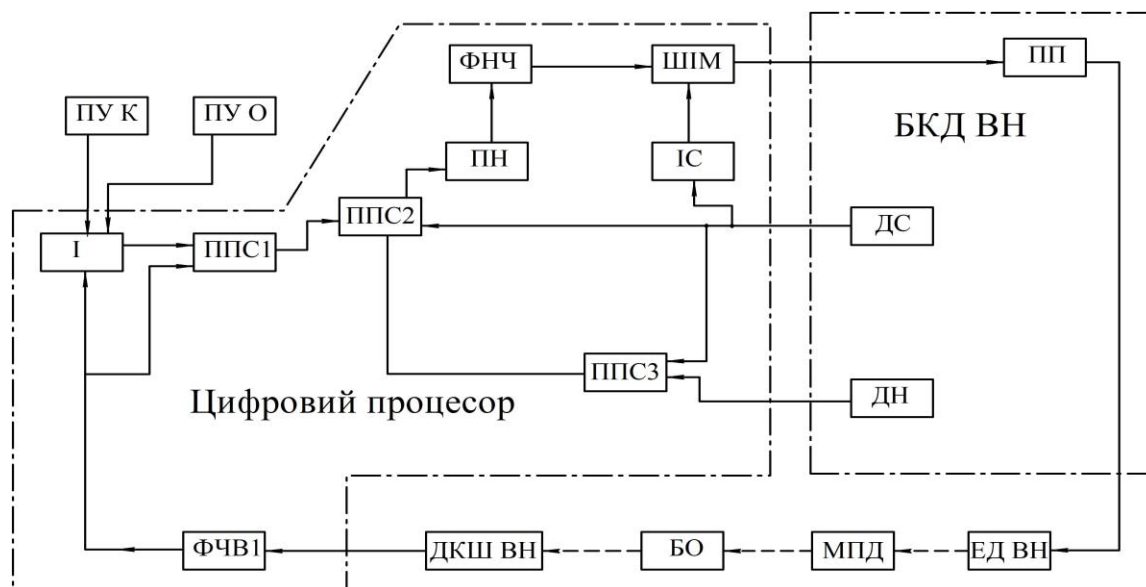


Рис. 1.4. Функціональна схема приводу ВН

де БКД ВН – блок керування двигуном каналу вертикального наведення, ПУ К, ПУ О – пульти управління командира та оператора, І – інтегратор, ІС – інтегратор струму, ПП – підсилювач потужності, ШІМ – широтно-імпульсний модулятор, ДС – датчик струму, ДН – датчик напруги, ПН – підсилювач напруги, ДКШ ВН – датчик кутової швидкості вертикального каналу, ППС1, ППС2, ППС3 – підсилювачі підсумовувачі, ФЧВ1 – фільтр високих частот, ФНЧ – фільтр низьких частот, БО – блок стабілізації вертикального каналу, МПД – механізм підйому, ЕД ВН – електродвигун вертикального наведення.

Сигнал з виходу інтегратора по підсилювально-перетворювальному тракту надходить на вхід модулятора широтно-імпульсного (ШІМ), який перетворює цей цифровий сигнал у сигнал імпульсної напруги з шириною імпульсу, що пропорційний величині напруги на вході модулятора.

Імпульсний сигнал з модулятора підсилюється у підсилювачі потужності ПП та надходить на обмотку якоря ЕДМ ВН.

ЕДМ-ВН через редуктор механізму підйому МПД та зубчастий сектор повертає вісь чутливості вертикального каналу у бік, протилежний відхиленню корпусу виробу, утримуючи його у заданому напрямку з похибкою, що обумовлена величиною похибки стабілізації.

Для одержання необхідних динамічних характеристик привода ВН (мінімальної похибки стабілізації та якості перехідного процесу) використовуються сигнали зворотного зв'язку щодо швидкості зміни похибки стабілізації, сигнали датчика струму й датчика напруги.

Сигнал ПУ(О) або ПУ(К) надходить на вхід інтегратора й підсумовується із сигналом ДКШ ВН. З виходу інтегратора сигнал надходить на підсилювально-перетворювальний тракт, де підсумовується із сигналами датчика струму й датчика напруги, після посилення й перетворення надходить на ЕДМ ВН. ЕДМ ВН через редуктор механізму підйому повертає вісь чутливості вертикального каналу у заданому напрямку зі швидкістю, що відповідає до знаку й величини сигналу ПУ.

Тому, що ДКШ-ВН вимірює тільки кутову швидкість відхилень БО і корпусу виробу в площині ВН, то лінійні переміщення виробу по вертикалі, а відповідно й БО щодо об'єкта спостереження, а також переміщення самого об'єкта необхідно компенсувати наведенням БО на цей об'єкт від ПУ.

Основні елементи (рис. 1.5), що забезпечують роботу привода ГН аналогічні по своєму функціональному призначенню елементам привода ВН.

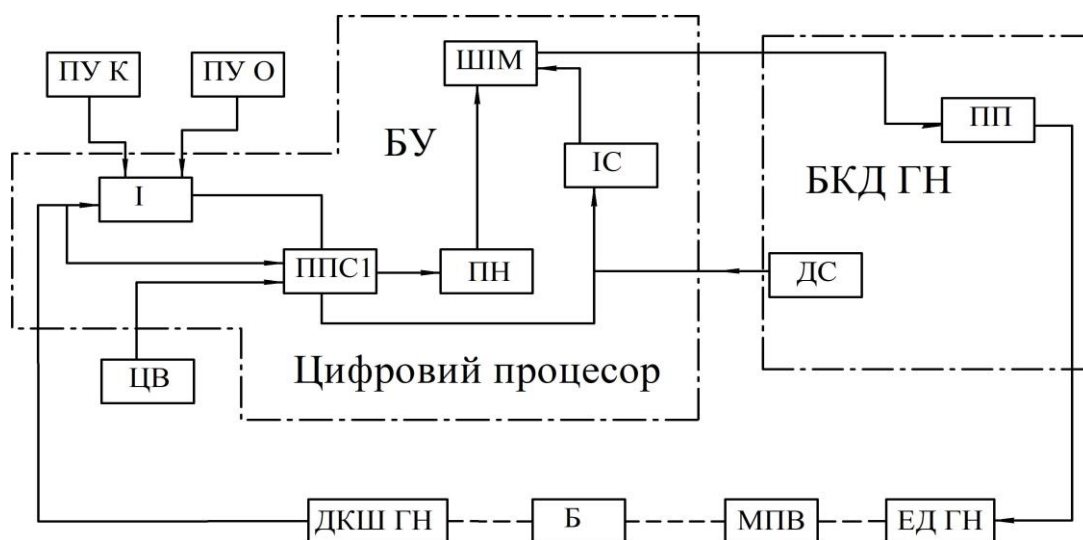


Рис. 1.5. Функціональна схема приводу ГН:

БУ – блок управління, БКД ГН – блок керування двигуном каналу горизонтального наведення, ПУ-К, ПУ-О – пульти управління командира та оператора, І – інтегратор, ІС – інтегратор струму, ПП – підсилювач потужності, ШІМ – широтно-імпульсний модулятор, ДС – датчик струму, ПН – підсилювач напруги, ЦВ – прилад обзору місцевості, ДКШ ГН – датчик кутової швидкості каналу ГН, ППС1 – підсилювач підсумовувач, Б – блок стабілізації горизонтального каналу, МПВ – механізм повороту, ЕД-ГН – електродвигун горизонтального наведення.

Основними елементами (рис. 1.5), що забезпечують роботу приводу ГН є: ДКШ-ГН; пульти управління ПУ-О або ПУ-К; керуючий двигуном підсилювач БКД-ГН, до складу якого входить підсилювач потужності ПП та датчик струму ДС; механізм повороту МПВ із електродвигуном ЕД-ГН; блок управління БУ, який містить цифрові: інтегратор І, інтегратор струму ІС, підсилювач підсумовуючий ППС1, підсилювач напруги ПН та широтно-імпульсний модулятор ШІМ.

Принцип дії приводу ГН при стабілізації й наведенні аналогічний принципу дії приводу ВН.

На відміну від привода ВН, сигнал зворотного зв'язку по швидкості зміни похибки стабілізації привода ГН формується відповідно до сигналів зворотного зв'язку по струму й абсолютної кутової швидкості.

ДКШ-ГН вимірює тільки кутову швидкість переміщення стабілізованої осі у горизонтальному каналі і тому лінійні переміщення виробу в горизонтальній площині, необхідно компенсувати наведенням стабілізованої осі горизонтального каналу у заданому напрямку.

1.4. Основні показники якості стабілізатора

Для підвищення якості стабілізації до стабілізаторів висуваються технічні вимоги щодо функціонування в режимах стабілізації та наведення, серед яких найбільш важливі [7–12]:

- стійкість;
- точність стабілізації блоку озброєння;
- якість стабілізації;
- швидкість наведення;
- час готовності;
- час безперервної роботи;
- надійність функціонування;
- характер та час перехідних процесів при гальмуванні при відпрацюванні великих кутів наведення.

1) Стійкість стабілізатора, як системи автоматичного регулювання, є така система, в якій перехідні процеси, що викликані дією механічних збурень на вертикальний та горизонтальний канал наведення протягом часу прагнуть зменшитися до нуля, а не призводити до коливань з наростаючою амплітудою, що можуть викликати автоколивання або призвести до монотонного збільшення похибки стабілізації.

2) Точність стабілізації є одним із головних показників кожного стабілізатора та оцінюється практично за допомогою середньої похибки стабілізації, яка повинна бути < 1 т.д. (1 тисячна дальності = 3,6 кут. хв.) [13–15]

по кожному з каналів вертикального (ВН) та горизонтального наведення (ГН), що визначається, як середнє значення абсолютних кутових відхилень стабілізованого блоку озброєнь від напрямку на ціль.

3) Якість стабілізації – один з показників, який знаходиться у прямій залежності від точності стабілізації. Чим вище точність стабілізації, тим менше відхилення від заданного напрямку вертикального та горизонтального каналів та тим вища якість стабілізації стабілізаторів. Якість стабілізації визначається жорсткістю стабілізатора та демпфуванням стабілізатора (кількість перебігів).

4) Швидкість наведення або стеження об'єкта, що стабілізується за ціллю, є ще одним показником якості стабілізатора в режимах наведення:

- точна наводка вертикального та горизонтального каналів повинна виконуватись в діапазоні швидкостей наведення від 0,07 °/с до 5-6 °/с [1];

- залежність кута повороту пульта управління у всьому діапазоні повинна бути близькою до лінійної (або лінійна) з градієнтом зміни кутової швидкості 0,002 рад/сек/град [1], що необхідно для безперервного та точного наведення каналів ВН та ГН у разі необхідності;

- виконавчі двигуни привода механізмів повороту та підйому повинні забезпечувати наведення з максимальними швидкостями та перекид каналів ВН та ГН за командою оператора з одного напрямку на іншу з кутовими швидкостями > 35–40 °/с.

5) Час готовності стабілізатора до роботи не повинен перевищувати часу, за який частота обертання гіротахometrів набере необхідні для проявлення в повній мірі гіроскопічних ефектів, що складає для електромеханічних гіротахometrів 1,5–2 хв, а для твердотільних гіротахometrів не більше на завершення перехідних процесів в апаратурі стабілізатора від 5 до 11с;

6) Надійність функціонування визначається тим:

- яка модель побудови прийнята за основу при конструюванні окремих електричних схем, вузлів, блоків, приладів;

- надійністю тих електро-радіо-виробів (ЕРВ), які використанні при розробці електронних схем стабілізатора;

– методами діагностування та самоконтролю роботи окремих вузлів, блоків, приладів та стабілізатора в цілому на відмову.

7) Час безперервної роботи визначається, виходячи з вимог технічного завдання на розробку стабілізатора та з ресурсу безперервної роботи кожного електро-радіо виробу (ЕРВ), які використані в електричних схемах. Для аналогових стабілізаторів час безперервної роботи повинен бути не менше 6 год з наступною перервою на 1 год. При виконанні особливих задач час включення не обмежений.

У кожному з відомих стабілізаторів, починаючи з 2Е36 і до сучасних, вказані вище вимоги реалізовані в різній мірі. В сучасних цифрових стабілізаторах ці технічні характеристики покращені.

1.5. Аналітичний огляд літератури у галузі методів вимірювання похибок стабілізації

Аналітичний огляд літератури в частині методів вимірювання похибки стабілізації визначається декількома технічними документами, в яких надано методики перевірок похибки стабілізації. Ці методики та прилади для контролю були розроблені в середині 60-80 років. Нажаль, навіть в спеціальній технічній літературі немає опису методики вимірювання динамічної похибки стабілізації. Технічні вимоги визначені, але методика не наведена.

Одна з відомих класичних методик, за якою визначалась срединна похибка стабілізації цілої лінійки аналогових стабілізаторів 2Е36-1 [9] у польових умовах на нормалізованій трасі (рис.1.6), базувалась на методі кінографування за допомогою кіноапарата з об'єктивом, що мав фокусну відстань не менш 300 мм. У полі зору кіноапарата повинні бути вертикальна й горизонтальна риски щита мішені, що перетинаються в центрі кадра. Швидкість кінозйомки повинна бути в межах 8-16 кадрів/с та підтримуватися в процесі кінографування постійною [1].

Кінографування виконувалось по білому щиті, що мав у центрі чорне перехрестя. Щит встановлювався на відстані 1300 м від початкової позиції кінозйомки (рис. 1.6).

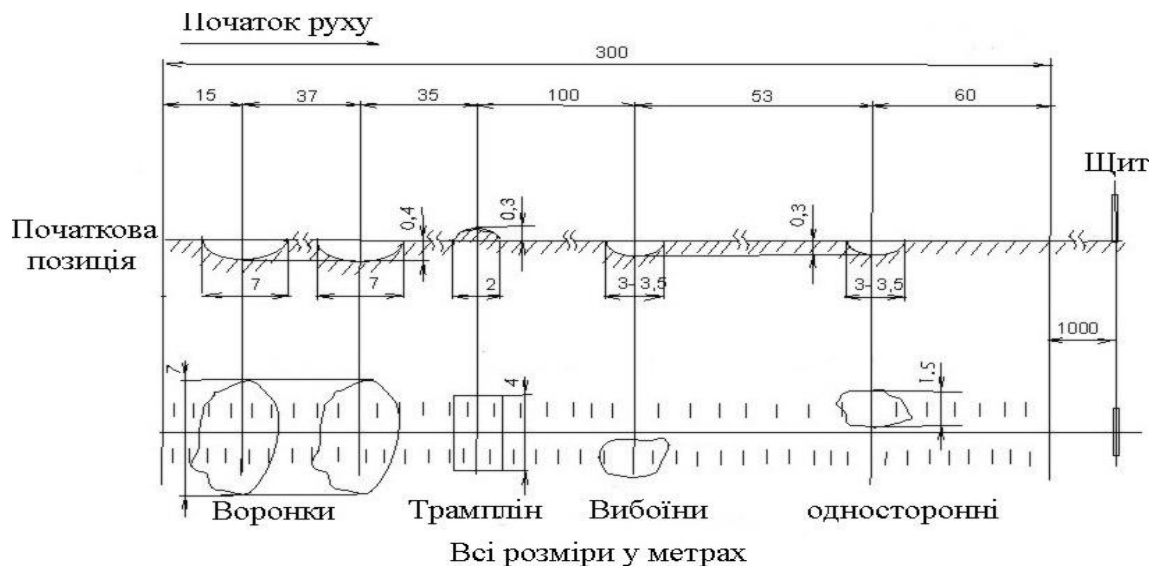


Рис. 1.6. Типова траса для визначення середньої похибки стабілізації

При суміщенні марки прицілу з перехрестям віддаленого щита у центрі поля кіноапарата перебував щит.

Під час кінофотографування водій повинен був вести виріб по трасі прямо зі швидкістю від 25 км/год до 30 км/год, по можливості не користуючись механізмами повороту, долаючи трасу на одній передачі, при подоланні перешкод дотримуватись всіх правил водіння (вчасно зменшувати газ та т.д.).

У процесі кінографування оператору користуватися пультом керування заборонялось. Швидкість руху виробу по трасі визначалась за формулою:

$$V = 1080/t, \quad (1.1)$$

де V – швидкість руху виробу км/час; t – час руху по трасі відстанню 300 м, с.

Для визначення середньої помилки проводились 3 заїзди.

Після прояву кіноплівки за допомогою дешифратора на міліметровий папір наносились крапки, відповідні до положення блоку озброєння у просторі.

Методи побудови й обробки кривих точності стабілізації були однакові для площин ВН і ГН. Обробку кривих точності стабілізації виконували з метою визначення серединного значення амплітуди коливань блоку озброєння при русі виробу по нормалізованій трасі.

На екрані дешифратора по кожному кадру визначалась відстань l_1 (l_2) (рис.1.7) у мм між рисками кіноапарата й відліковими лініями на щиті, видимими на зображенні щита (для ВН – між горизонтальними, для ГН – між вертикальними).

У випадку, коли перехрестя щита не було видно, відлік можна було робити від одного з кутів щита. Помножуючи вимір відстані на коефіцієнт збільшення M (формула 1.2) та послідовно відкладаючи отримані величини на міліметровий папір від лінії відліку (одночасно заносились ці цифри в таблицю 1.1 у графу 1), отримувались ряд точок, з'єднуючи які, одержували криву точності стабілізації при русі виробу по нормалізованій трасі (рис. 1.2).

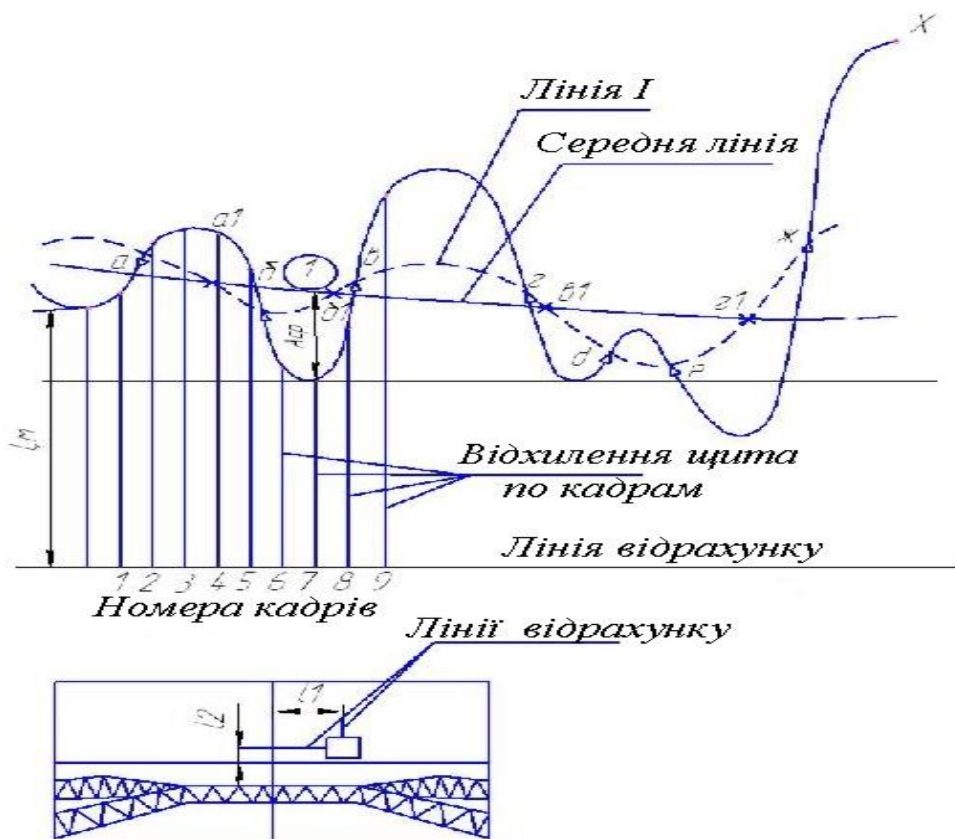


Рис.1.7. Приклад обробки кінограми

Обробка кожної кривої точності починалась із проведення середньої лінії. Для цього ділянки кривої між двома найближчими максимальними відхиленнями ділились навпіл та отримані точки, позначені Δ , з'єднувались плавною лінією I.

Ділянки лінії I між двома найближчими максимальними відхиленнями також ділились навпіл і отримані крапки, позначені x , з'єднувались плавною лінією, яка з достатньою точністю і є середньою лінією для коливань блоку похибка якого вимірюється.

Потім визначались і заносились у таблицю 1.2 (графа 2) відхилення кривої точності від середньої лінії по кожному кадру в мм із урахуванням знаку. Для визначення середнього значення точності необхідно було зробити перерахування отриманих відхилень у т. д. і заповнити графи 3 і 4 таблиці 1.1.

Перерахування виконувалось за формулою:

$$\theta = (1000 \cdot A_{cp}) / F \cdot k \cdot M, \quad (1.2)$$

де θ – амплітуда похибки, т. д.; F – фокусна відстань об'єктива кіноапарата, мм; k – кратність збільшення об'єктива дешифратора; M – коефіцієнт збільшення, уведений для зручності побудови кривої точності, для ВН $M=20$, для ГН $M=10$; A_{cp} – відхилення кривої точності по кожному кадру щодо середньої лінії, мм.

Таблиця 1.2

Результати випробувань по визначенню середньої похибки стабілізації

Відстань між рисками кіноапарата та підрахунковими лініями, видимими на зображенні щита, мм $L \cdot m$	Відхилення кривої точності від середньої лінії по кожному кадру, мм A_{cp}	Кількість відхилень від середньої лінії по інтервалам, шт. n			Примітка
		ділення в тисячних відстані (т. д.)	Кіл.	% від Σn	
1	2	3	4	5	6
		Від 0 до 0,1 Від 0,1 до 0,2 Від 1,5 до 3,0 Понад 3,0			
		Σni		100%	

Отримані значення групувалися по величинах помилок (наприклад, від 0,1 до 0,2). Бувувався графік розподілу (рис. 1.8), на якому із точки 50% наносилась горизонтальна пряма.

Ця пряма проводилась до перетинання з кривою розподілу. По точці перетинання на осі абсцис визначалось значення похибки в т. д.

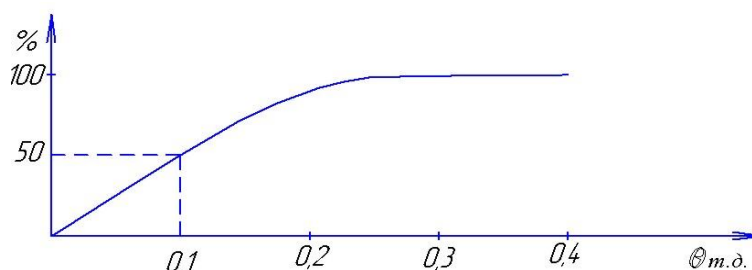


Рис. 1.8. Крива розподілу

За середнє значення помилки приймалось середнє арифметичне значення по трьом заїздам.

Як ми бачимо з викладеного вище матеріалу, методика виміру середньої похибки стабілізації, була досить трудомістка, проводилась тільки на періодичних випробуваннях стабілізатора (на двох серійних стабілізаторах в рік) потребувала наявності нормалізованої траси, додаткової спеціальної кіноапаратури, кіноплівки та проведення не кваліфікованих рутинних робіт щодо визначення координат відхилень по кожному кадру кіноплівки, побудові графіків середньої лінії, кривої розподілу, по якій визначається значення середньої похибки стабілізації.

Цей метод визначення середньої похибки застосовується і зараз для перевірок похибок цифрових стабілізаторів, але вона дещо змінилась в позитивну сторону, враховуючи те, що не має необхідності встановлювати кінокамеру. Її замінив оптико-електронний модуль, інформація з якого надходить на вхід відеомонітора, до якого приєднується через пристрій погодження Pinnacle MovieBoxPlus USB, за допомогою якого відео зображення передається для запису на ноутбук. Після виконання випробувань інформація за спеціально розробленою програмою обробляється на комп'ютері, який за

підсумками обчислення видає значення середньої похибки стабілізації по каналах горизонтального та вертикального наведення.

У технічній документації на стабілізатор 2Е36-1, окрім наведеної вище методики перевірки середньої похибки, були дозвільні посилання на використання в перевірках приладу ПБ2.768.038 (Прилад ПС).

Прилад ПС під'єднується через технологічні кабелі до роз'єму Ш4-КПА блоку управління стабілізатора 2Е36-1.

Прилад ПС є електронним вимірювальним пристроєм, що призначений для визначення величини середньої помилки й відсотка часу нестабілізованого стану виробу 2Е26М по каналах ГН і ВН.

Наведена методика роботи з приладом ПС вказує на те, що середина помилка E – така величина, що її ймовірність не переверщує по абсолютній величині 0,5.

За допомогою приладу ПС для кожного із трьох порогів α_1 , відповідних установленим рівням помилок, визначається різниця часу Δt між часом, протягом якого помилка була менше встановленого рівня, і часом, протягом якого помилка була більше його, і знак різниці. За отриманими результатами на графіку наносяться три крапки, які з'єднуються плавною лінією (рис. 1.10).

Точка перетинання отриманої кривої з віссю абсцис дає серединне значення помилки E .

Для визначення не стабілізованого стану обирається поріг, величина якого відповідає $4E$, та вимірюється час, протягом якого помилка перевищувала цей поріг.

1.5.1. Схема електрична функціональна приладу ПС

Функціональна електрична схема приладу ПС [9] (рис. 1.9) складається з його функціональних частин: підсилювачів ВН та ГН; фазочутливих випрямлячів ВН та ГН; компенсаторів ВН і ГН; джерел опорної напруги ВН та ГН; компараторів ВН 1,2,3,4 та ГН 5,6,7,8; схем знаку ВН 1,2,3 та ГН 4,5,6; реверсивних лічильників ВН 1,2,3 та ГН 4,5,6; лічильників $4E$ ВН та ГН; схем

комутації ВН та ГН; дешифраторів ВН та ГН; схем керування; лічильника загального часу; блоку живлення.

Сигнал помилки у вигляді змінного струму частотою 400 Гц надходить на вхід підсилювача й підсилюється до необхідної величини.

За допомогою ФЧВ виділяється огинаюча крива цього сигналу, полярність якого залежить від співвідношення фаз вхідного й опорного сигналів.

Автоматичну компенсацію напруги, пропорційну статичній помилці, забезпечує компенсатор, який є підсилювачем постійного струму, охоплений ємнісним зворотним зв'язком. Постійна часу компенсатора встановлена на два порядки більше середньої частоти сигналу помилки.

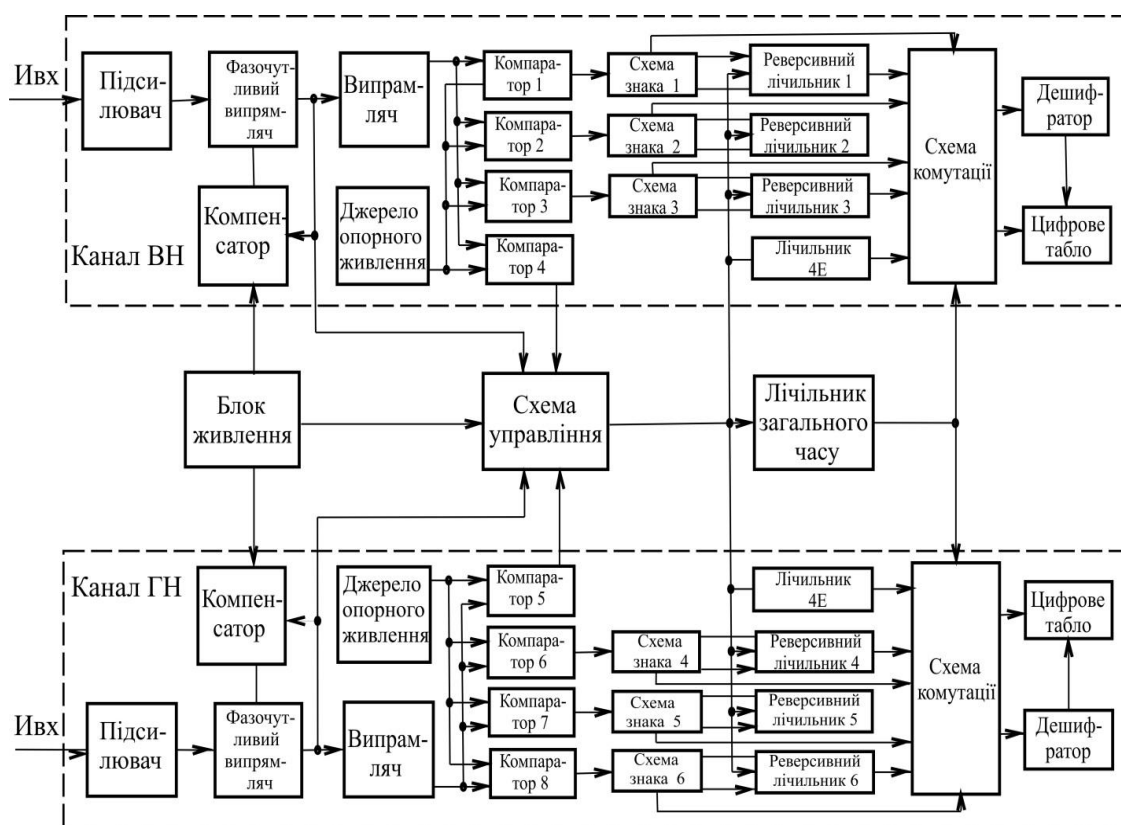


Рис. 1.9. Схема електрична функціональна приладу ПС

Симетрична щодо нуля змінна напруга надходить на випрямляч, який перетворює її в однополярну напругу. Вихід випрямляча з'єднано з першими входами компараторів 1,2,3 та 4 (5,6,7, і 8) на інші входи, яких подаються опорні напруги, пропорційні встановленим рівням помилок. Залежно від сигналу

помилки й опорної напруги компаратори 1,2,3 (6,7,8) разом з реверсивними лічильниками 1,2,3 (6,7,8) виробляють сигнали «додавання» або «вирахування». Якщо сигнал помилки менше опорної напруги, то компаратор виробляє сигнал «додавання», а якщо ні, то – сигнал вирахування. Компаратор 4 (5) формує сигнал, коли помилка перевищує в чотири рази середнє значення. Схеми знаку 1,2,3 (4,5,6), разом з реверсивними лічильниками 1,2,3 (4,5,6), призначені для підрахунку різниці між кількістю імпульсів генератора, які надходять на лічильники, коли помилка була менше встановленої, та кількістю імпульсів, коли помилка була більше встановленої, а також для визначення знаку різниці.

Режим «додавання» або «вирахування» реверсивних лічильників визначається станом відповідного компаратора та знаку схеми. Усі лічильники складаються із трьох декад. Якщо сигнал помилки більше рівня 4Е, то сигнал з компаратором 4(5) надходить на схему керування, яка здійснює подачу імпульсів на лічильник 4Е та забороняє проходження імпульсів на реверсивні лічильники 1,2,3 та (4,5,6). Якщо ж сигнал помилки менше рівня 4Е, то імпульси генератора проходять на реверсивні лічильники 1,2,3 (4,5,6) та не проходять на лічильник 4Е.

Схема керування формує рахункові імпульси тільки під час виміру.

По закінченню виміру за допомогою схеми комутації, дешифратори видають інформацію про кількість імпульсів та знак висвічуються на табло.

Для перевірки похибки спочатку проводять перевірку та налаштування приладу ПС, який приєднано до стабілізатора, а потім виконують три заїзди по нормалізованій трасі. Прилад ПС вмикається для вимірів та вимикається оператором виробу відповідно з початком та закінченням траси.

По закінченню кожного з заїздів перемикач «ОПРОС» встановлюється в положення 1, 2, 3, 4 та ОВ. В кожному із положень знімаються покази табло та вносяться у таблицю 1.3.

Зона, в якій знаходиться значення середньої похибки, визначається за знаками безпосередньо після кожного заїзду. Зміна знаку з «-» на «+» для двох рівнів дає цю зону.

Таблиця 1.3.

Результати випробувань

Рівні похибок, т.д.		Положення перемикача «ОПРОС»	Знак		Показання цифрового табло	
ВН	ГН		ВН	ГН	ВН	ГН
0,1	0,15	1			a_1	b_1
0,2	0,3	2			a_2	b_2
0,4	0,6	3			a_3	b_3
1,6	2,4	4			a_4	b_4
ОВ		ОВ			a_5	

Наприклад. Показання цифрового табло для ВН: $(-a_1)$, $(-a_2)$, (a_3) .

Срединна похибка знаходиться у зоні між рівнями 0,2 – 0,4 т. д.

1.5.2. Визначення срединної похибки та часу нестабілізованого стану

Необхідно відкласти по осі абсцис рівні похибок 0,1, 0,2, 0,4 т.д. для каналу ВН та 0,15, 0,3, 0,6 т.д для каналу ГН, а на осі ординат - відповідні цим рівням покази цифрового табло зі знаком. Отримані точки необхідно з'єднати плавною кривою. Точка перетину цієї кривої з віссю абсцис дає значення срединної похибки E (рис.1.10).

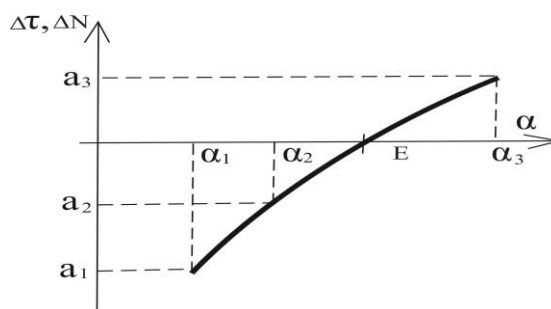


Рис. 1.10 Крива похибки стабілізації

Процент часу нестабілізованого стану А визначається за формулами:

$$A_{BH} = a_4/a_5 \times 100\% \quad (1.3)$$

$$A_{ГН} = a_4/a_5 \times 100\% \quad (1.4)$$

За даними трьох вимірів визначають середнє значення серединної похибки та середнє значення процента часу нестабілізованого положення (для 2Е36-1 по осі абсцис відкладають рівні похибок 0,25, 0,5, 1,0 тоді.).

Висновки до розділу 1

1. Аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів не має. В той час, вимоги до точності засобів та методів вимірювання, визначених вище механічних величин стабілізаторів, стали значно вищими.

2. Модель побудови лінійки вітчизняних стабілізаторів відповідає принципу «залежної стабілізації» – жорсткого зв'язку вертикального та горизонтального каналів стабілізатора з приладом спостереження за об'єктами.

3. Оцінка точності стабілізаторів проводиться за методикою визначення серединної похибки на двох комплектах стабілізаторів на нормалізованій трасі у виробі замовника. Перевірка точності стабілізації на підприємстві-виробнику не проводиться.

4. Вимірювання динамічної похибки проводиться лише на стабілізаторах, які мають «незалежну стабілізацію».

Список літератури до розділу 1

1. Лепешинский И.Ю. Автоматические системы управления вооружением / И.Ю. Лепешинский, П.М. Варлаков, Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев [Електроний ресурс] // Учебное пособие. – Омск. – 2010. Retrieved from <http://mslstaryussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773>.

2. Безвесільна О.М. Наукові, технологічні, організаційні та впроваджувальні основи створення нового комплексу стабілізатора озброєння

легких броньованих машин / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук // Монографія. – НПО «Пріоритети», Київ з грифом ЖДТУ. – 2015. – С 176.

3. Безвесільна О.М. Оптимізація, ідентифікація, алгоритмічна обробка параметрів чутливих елементів стабілізатора легкої броньованої техніки /.

О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, С.П. Маляров, Л.О. Чепюк // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2015. – С. 217.

4. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння. / О.М. Безвесільна, В.П. Квасніков, В.Г. Цірук, В.В. Чиковані. // Монографія. – НПО «Пріоритети», Київ: ЖДТУ. – 2014. – С.176.

5. Безвесільна О.М. Методи оптимізації цільової функції та ідентифікації характеристик прецизійних навігаційних систем / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Ю.О. Подчашинський // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – С.201.

6. Безвесільна О.М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, С.С. Ткаченко // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – С.174.

7. Цірук В.Г. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасніков, Л.О. Чепюк // Вісник Інженерної академії України. – № 2, 2014р. – С. 155 – 159.

8. Цірук В.Г. Наукові, технологічні, організаційні та впроваджувальні основи створення нового комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих машин / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук. Монографія. // НПО «Пріоритети» – Київ з грифом ЖДТУ. – 2015. – С.176.

9. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Боевая машина пехоты БМП-2. Часть. 1. [Електроний ресурс] /– 1987. – Retrieved from <http://armyman/info/books/id-44.html>.

10. Безвесільна О.М. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин: підручник / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, Г.С. Тимчик // – Житомир: ЖДТУ. – 2011. – С.876.

11. Безвесільна О.М. Особливості цільових задач, що вирішуються рухомими об'єктами та їх вплив на склад комплексів орієнтації і навігації / О.М. Безвесільна // Міжнародний науковий журнал «Технологічні комплекси» – № 1(7), 2013р. – С. 51 – 53.
12. Левин И. Я. Справочник конструктора точных приборов./ Левин И. Я. // Москва, Оборонгиз. – 1962. – С.727.
13. Цірук В.Г. Компенсація похибок датчиків первинної інформації / В.Г. Цірук // VII Міжнародна науково-технічна конференція "Гіротехнології, навігація керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки", 23,24 квітня 2009 р.: Збірка доповідей. Ч1/К.: НТУУ "КПІ".– 2009.- С.36–42.
14. Бабаев А.А. Стабилизация оптических приборов / А.А. Бабаев // Л.:Машиностроение. – 1975. – С.158.
15. Безвесільна О.М. Принципи побудови системи для вимірювання механічних величин на основі двомірної інформації / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський // Вісник Інженерної академії України. – №3,1974, 2009. – С.52-55.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНІСТНИХ ХРАКТЕРИСТИК ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ

Мета даного розділу запропонувати методи та засоби підвищення точністних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації.

Факторами, що забезпечують підвищення швидкодії та точності стабілізації є заміна електромеханічних гіротахometrів, підвищення швидкості обробки інформації у цифровому обчислювачі блоку управління, підвищення швидкодії всіх складових частин виконавчого тракту – підсилювача потужності та електродвигуна.

2.1. Застосування твердотільних гіроскопів замість електромеханічних гіротахometrів ГТ46

Аналіз динамічних характеристик, приладового складу, структури та блоків відомих аналогових та цифрових стабілізаторів [2,3] побудованих на базі електромеханічних гіротахometrів ГТ46 та електродвигунів ЕДМ20 показує, що точність стабілізації при швидкодіючих неконтрольованих збуреннях (стрільба, русі виробу по пересіченій місцевості) не може бути значно підвищена за наявності у електромеханічних гіротахometrів значного часу перебігу перехідних процесів, відповідно та низької смуги пропускання частот.

Крім обмеження по точності стабілізації, що визначають ГТ46 та ЕДМ20, такт роботи обчислювача цифрового блоку управління складає 400 Гц та прийнятий у зв'язку з наявності у складі стабілізатора блоку живлення для ГТ46, що також є стримуючим фактором для підвищення точності. Так, при тривалості зовнішніх збуджуючих ударів 5 мс, при дискретності роботи обчислювача

2,5 мс, реакція стабілізатора на усунення дії збуджуючих моментів може запізнюватись на 2,5 мс – тобто рівно на половину часу збуджуючого удару, що призводить до додаткової похибки.

Підвищення швидкодії електромеханічних гіротахometrів неможливе при збереженні його принципу роботи - компенсація гіроскопічного моменту пружністю торсіона. Запропонований варіант модернізації гіротахometrа за рахунок підвищення жорсткості торсіону та зменшення кута розвороту гіровузла повинен був збільшити смугу пропускання на 40%. Істотне підвищення смуги пропускання можливе лише при застосуванні гіротахometrів компенсаційного типу, в яких компенсація гіроскопічного моменту виконується спеціальним електричним датчиком моменту – електричною пружиною.

Швидкодія характеризується смугою пропускання частот, часом швидкодії електродвигунів та підсилювачів, моментом навантажень на електроприводи, а також дискретністю за часом цифрового обчислювача інформації.

Проведений аналіз приладового складу, структури та динамічних параметрів блоків відомих цифрових стабілізаторів показав, що для підвищення точності стабілізації та швидкодії резервів не має.

Факторами, що забезпечують підвищення швидкодії та точності стабілізації є заміна електромеханічних гіротахometrів, підвищення швидкості обробки інформації у цифровому обчислювачі блоку управління, підвищення швидкодії всіх складових частин виконавчого тракту – підсилювача потужності та електродвигуна.

Враховуючи наведене вище, можна сказати, що для підвищення точності необхідно реалізувати наступні технічні рішення.

1. Застосувати більш точні датчики кутової швидкості зі смугою пропускання частот 100Гц та вище (чим вище, тим скоріше реакція на збуджуючи діяння).

2. Збільшити частоту роботи обчислювача до ≈ 1000 Гц.

Результати математичного моделювання показують, що при збільшенні частоти до 2 кГц динамічна похибка стабілізації зменшується у 2 рази по зрівнянню з частотою 400 Гц, що мають сучасні стабілізатори.

3. Застосувати електродвигуни з меншими, по зрівнянню з застосованими двигунами, електромагнітними та електромеханічними постійними і збільшеними пусковими та номінальними моментами. Доцільно підвищити номінальний момент до (2,6-3) Нм, а потужність до (800-1000) Вт.

4. Усунути вплив нульових сигналів ДКШ, що призводять до самовідведення вертикального та горизонтального каналів при функціонуванні стабілізатора в режимі підвищеної точності. (режим «УПР»).

5. Змінити модель побудови стабілізатора з сумісної стабілізації, коли вертикальний та горизонтальний стабілізовані канали «жорстко» поєднанні з приладом спостереження за місцевістю, або «залежної» стабілізації на автономну або «незалежну» стабілізацію, де ці прилади не мають «жорсткого» поєднання.

Для реалізації незалежної стабілізації необхідно включення до складу стабілізатора та СУВ спеціального приладу з стабілізованим полем зору (СПЗ) або стабілізованою лінією візування поля зору (СЛВ).

6. Розробити метод вимірювання динамічної похибки стабілізації, що дозволить проводити вимірювання одного з головних технічних параметрів - точності стабілізації без проведення додаткових польових випробувань.

Розглянемо всі окреслені шляхи зміни моделі побудови стабілізатора, що можуть призвести до покращення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних величин та стабілізації.

Використання як чутливих елементів електромеханічних гіротахometrів, на сьогодні, у багатьох випадках виправдано в зв'язку з низьким рівнем шумів, гарними динамічними характеристиками, задовільними характеристиками по точності, напрацьованими технологічними процесами виготовлення. Але механічні гіротахометри мають ряд недоліків: час готовності до роботи визначається часом розгону гіротахометра, низька смуга частот, вихідні сигнали видаються в аналоговому вигляді, незадовільна стійкість до механічних ударних

факторів, необхідність додаткового перетворювача енергії для живлення гіромоторів.

Один з визначених шляхів підвищення точності приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації є заміна традиційних електромеханічних гіроскопічних приладів, які мають вихідну аналогову інформацію, на твердотільні гіротахметри (Коріолісові вібраційні гіроскопи /КВГ/, волоконно-оптичні гіроскопи /ВОГ/, MEMS) з цифровою вихідною інформацією та значно розширеною смугою пропускання. Крім підвищеної швидкодії, вони мають наступні переваги перед електромеханічними: ресурс роботи у 15–20 разів вищий тому, що вони не мають обертаючих частин, які обмежують ресурс роботи.

Технічні характеристики сенсорів кутової швидкості за даними джерел наведені у відповідних таблицях (ГТ46 табл. 2.1 [4,5], КВГ табл. 2.2 [6,7], ВОГ ВГ910Ф табл. 2.4 [8], MEMS G20-75-100 табл. 2.3 [9-13]).

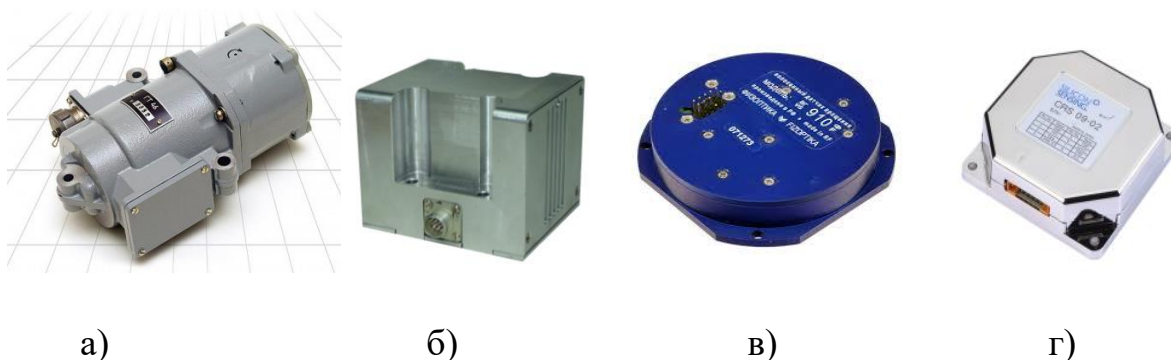


Рис. 2.1. Датчики кутової швидкості

а) – електромеханічний гіроскоп ГТ46; б) – Кориолісовий вібраційний гіроскоп КВГ26; в) – оптико-волоконний гіроскоп ВГ910Ф; г) – мікромеханічний гіроскоп (MEMS) CRS03

Таблиця 2.1

Технічні характеристики ГТ46

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 50
2	Смуга частот	Гц	30
3	Поріг чутливості	град/с	0,015
4	Масштабний коефіцієнт (МК)	В·с/град	0,17
5	Асиметрія вихідної характеристики	%	10
6	Величина сигналу на нерухомій основі	мВ	100
7	Зона застою	мВ	20
8	Перехресна чутливість	мВ·с/град	1
9	Декремент загасання	—	0,7
10	Власна частота	Гц	$20 \div 25$
11	Живлення від джерела 3-фазного струму	В/Гц	36/400
12	Струм споживання	А	0,4
13	Час готовності	с	120
14	Час безперервної роботи	год	6
15	Ресурс	год	500
16	Габаритні розміри	мм	190×124× 86
17	Маса	кг	2,5

Таблиця 2.2

Технічні характеристики КВГ

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	$\pm 200, \pm 400$
2	Смуга частот	Гц	не менше 100
3	Масштабний коефіцієнт (МК)	1/(град/сек)*	0,04
	Нормальні умови +25 °С		

Продовження Таблиці 2.2

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
4	Лінійність МК	%	$\leq 0,04$
5	Повторюваність МК від вкл. до вкл	%	$\leq 0,03$
6	Повторюваність зміщення нуля	град/час	5
8	Шум (1σ)	град/час	0,003
	Температурний діапазон від (-40 до +75)°C		
9	Повторюваність зміщення нуля	град/час	5
10	Стабільність зміщення нуля	град/час	<5
11	Випадковий шум (1σ)	град/час	0,01
12	Температурна стабільність МК (включаючи гістерезис та градієнт температур, 1	%	0,2
	Умови експлуатації		
13	Робочий температурний діапазон	°C	-40 ÷ +75
14	Середнє напруцювання на відмову (СНВ)	ч	> 500000
	Параметри живлення		
15	Напруга живлення	В	+(15 ÷ 30)
16	Споживаєма потужність	Вт	<2,5
17	Інтерфейс	RS-422, RS-485	
18	Габарити: 1. чутливий елемент (ЧЕ) + Ел. Блок 2. єдина конструкція	1. ЧЕ: Ø40×h27мм Ел. Блок 50×50×25 2. 72×62×58мм	
19	Маса:	1. 200гр. 2. 400 гр.	
20	* Вихідний код /МК = град/сек/		

Таблиця 2.3

Технічні характеристики MEMS G20-075-100

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1	Діапазон кутових швидкостей	град/с	± 75

Продовження Таблиці 2.3

№	Параметри	Одиниці	№
2	Смуга частот	Гц	100
3	Коефіцієнт передачі	мВ/(град/сек)	15
4	Випадковий шум	град/сек/ $\sqrt{\text{Гц}}$	0,05
5	Точність виставки	мрад	$\pm 17,5$
6	Час готовності	с	н/д
7	Стійкість до ударів	g	500
8	Температурний діапазон	°C	-40 ÷ +85
9	Маса	г	30
10	Живлення	В	н/д

Таблиця 2.4

Технічні характеристики ВОГ910Ф

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення мін/макс
1	Масштабний коефіцієнт (МК), (+20°C)	мВ/(град/сек)	5,5/7,5
2	Стабільність МК, СКВ при постійній температурі, 1 СКВ	%	-/0,2
4	Температурний коефіцієнт МК	% / * °C	0/0,1
5	Зсув нуля	мВ	-/0,4
6	Стабільність зсуву нуля при постійній температурі, 1 СКВ	град/год	-/4
7	Температурний коефіцієнт зсуву нуля	мкВ/ °C	-/3
8	Діапазон вимірюємих швидкостей	°/сек	370
9	Спектральна платність шумової складової вихідного сигналу	мкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$	-/6
10	Час готовності	сек	-/0,2
11	Струм живлення +5В (20 °C)	мА	-/190
12	Смуга частот по рівню 0,7	кГц	0,4/-
13	Швидкість порту (по умовчанняю)	кБод	-

Продовження Таблиці 2.4

№	Параметри		Одиниці виміру	Значення
14	Маса (приблизно)		г	120
15	Габарити (без фланців та роз'єму) 82,3×82,3×20		мм	82,3×82,3×20
16	Температура робоча		°C	-40 ÷ +70
17	Температура гранична (2 години)		°C	-55 ÷ +85
18	Температура робоча		°C	-40 ÷ +70
19	Температура гранична (2 години)		°C	-55 ÷ +85
20	Вібрація, СКВ		g /Гц	12/20...200 0
21	Удари		мс/g	1/150
22	Прискорення		g	5
23	Параметри надійності	Середнє напрацювання на відмову	час	60000
		Строк служби (прогноз)	років	15

Так, КВГ відрізняються від традиційних електромеханічних гіроскопів підвищеною надійністю та довговічністю (табл. 2.2) тому, що не мають обертаючих частин, широку смугу пропускання та стійкість до механічних впливів.

Таблиця 2.5

Дані по середньому часу напрацювання на відмову КВГ

Умови довкілля по застосуванню	СЧНВ*Дов. імовірність 99% годин (років)	СЧНВ*Дов. імовірність 99,9% годин (років)
Наземні рухливі об'єкти, E=4,0	408042 (46)	271929 (31)
Морські об'єкти в приміщенні, E=4,0	408042 (46)	271929 (31)
Літаки з екіпажем, грузом, винищувачі, E=5,0	326434(37)	217543 (24)

Оцінка середнього часу напрацювання на відмову (СЧНВ) проводилась за даними випробувань багатьох КВГ (табл. 2.5) з урахуванням коефіцієнта Е навколишнього середовища у відповідності з стандартами США MIL-HDBK-217FNotice2 [4].

2.2. Підвищення смуги пропускання та частоти інформаційного обміну

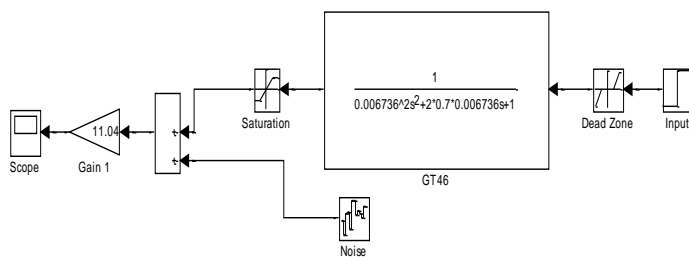
Для підтвердження смуги пропускання електромеханічних гіротахometrів ГТ46 були проведені експериментальні дослідження, результати яких наведені в розділі 4 п. 4.2. Результати досліджень показали, що смуга пропускання гіротахometrів ГТ46 знаходиться у діапазоні (32,2 – 35,9) Гц. Ці результати експериментальних досліджень підтверджують данні наведені в таблиці 2.1, та ті данні, що наводяться у різних технічних джерелах інформації стосовно того, що смуга пропускання ГТ46 дорівнює – 30 Гц.

Із всіх технічних характеристик нових твердотільних ДКШ оберемо найбільш привабливі тим, що вони мають найбільші значення у порівнянні з ГТ46, це смуга пропускання частот, дискретність обміну інформацією, та зможуть покращити показники точності та швидкодії стабілізатора.

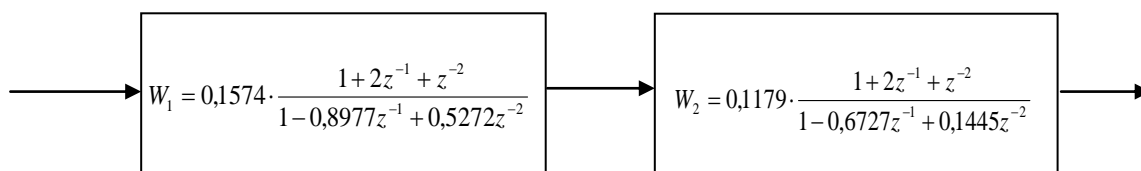
Оцінка впливу смуги пропускання ГТ46 (30 Гц), MEMS (100 Гц) та ВОГ ВГ910Ф (400 Гц) та дискретності обчислення інформаційного обміну 1,7 мс (600 Гц) та 1,0 мс (1000 Гц) була проведена методами математичного моделювання. Для виконання цих обчислень необхідно було:

- визначити математичні моделі ДКШ, які будуть задіяні при моделюванні;
- визначити, які зовнішні збудження є типовими для даного класу об'єктів та будуть при цьому задіяні при моделюванні;
- провести роботи по моделюванню параметрів стабілізатора для кожного ДКШ з оцінкою зміни точнісних характеристик стабілізатора, провести обов'язкове дослідження впливу смуги пропускання та дискретності обчислення на параметри стабілізатора.

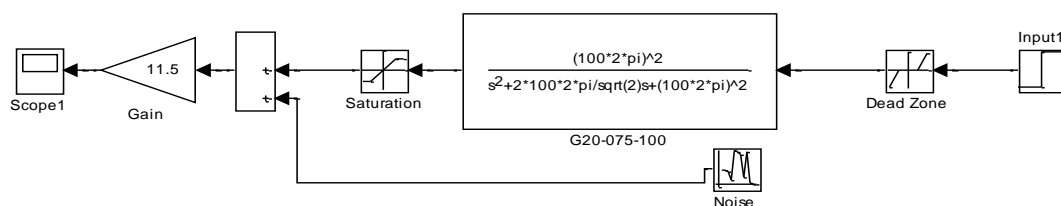
При моделюванні використовувались математичні моделі гіроскопічних вимірювачів швидкості ГТ46, КВГ, MEMS G20-075-100, які представлені на рис. 2.2.



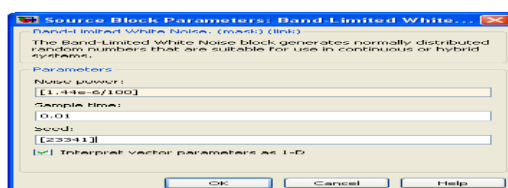
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.2. Математичні моделі ДКШ: а – ГТ46, б – КВГ, в – МЕМС G20-075-100, г – Band-limited White Noise

В основу аналізу результатів моделювання були покладені оцінка динамічної похибки стабілізатора та його реакція на імпульсний вплив.

Оцінка динамічної погрішності стабілізатора проводилася на підставі дослідження реакції на гармонійний сигнал, що подавалася на вхід ДКШ (рис. 2.2). Амплітуда та частота змінення сигналу, що відповідає коливанням корпусу виробу з амплітудою $2,5^\circ$ та частотою 0,8 Гц аналогічно методам випробувань 2E52.

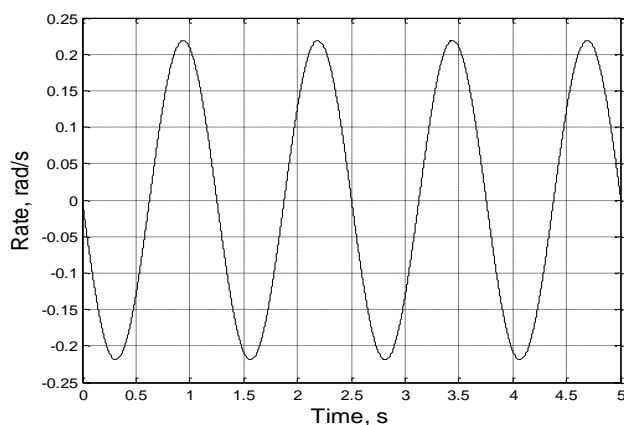


Рис. 2.3. Гармонійний вплив, що задається на вході ДКШ

Параметри імпульсних впливів приймалися у відповідності за даними отриманими з ДП «ХКБМ» при проведенні випробувань стабілізатора на зовнішні ударні навантаження – тривалість імпульсу 5,0 мс з амплітудою 0,5 рад/с, що відповідає вихідному сигналу ГТ46 на рівні 6В.

Проведений порівняльний аналіз із застосуванням методів математичного моделювання підтвердив доцільність застосування як сенсорів кутової швидкості твердотільних гіротахometrів за рахунок більш високої смуги пропускання та підвищеної частоти інформаційного обміну, що в свою чергу призводить до зменшення похибок та покращення характеристик стабілізаторів.

За результатами досліджень зроблено позитивні висновки про те, що застосування в схемі стабілізаторів твердотільних ДКШ дозволяє отримати підвищення точнісних характеристик за умови, що буде забезпечено дискретність обчислення сигналу управління на рівні не більш 1000 Гц (1,0 мс) та полосу пропускання не менше 100 Гц.

2.3. Підвищення швидкодії за рахунок покращення технічних характеристик приладового складу стабілізатора

Для оцінки постійних часу електродвигунів, що використовуються у стабілізаторах проведені експериментальні дослідження двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20. Результати проведених робіт наведені окремим поданням в розділі 4 п. 4.1.

Для підвищення швидкодії необхідно використовувати електродвигуни з меншими по зрівнянню з застосованими двигунами електромагнітними та електромеханічними постійними та збільшеними пусковими та номінальними моментами. Доцільно підвищити номінальний момент до (2,6-3) Нм, а потужність до (800-1000) Вт. Порівняльні технічні характеристики електродвигунів наведені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Порівняльні характеристики електродвигунів

Параметри двигуна	ЕДМ03	ЕДМ20	ЕДМ20М	ЕДМ14	ЕДМ600	БДПТ
Напруга живлення	23 В	23 В	23 В	23 В	23 В	-
Напруга зрушення у режимі холостого ходу, В	2,0	-	-	-	0,7	-
Постійна е.р.с, Вс/рад	0,052	0,053	-	0,056	0,069	-
Опір обмотки, Ом	0,22	0,125	0,125	0,45	0,07	0,067
Постійна часу якоря, с	$0,32 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	-	-	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$
Момент інерції якоря, кгмс ²	$3,15 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	-	-
Момент опору, Нм	1,3	1,3	1,3	0,57	1,9	2,0
Постійна моменту навантаження на валу, Нм/А	0,052	0,054	-	0,056	0,069	-

Продовження Таблиці 2.6

Параметри двигуна	ЕДМ03	ЕДМ20	ЕДМ20М	ЕДМ14	ЕДМ600	БДПТ
Пусковий момент, Нм	9,33	7,5	7,48	-	13,6	-
Потужність, Вт	470	400	432	180	650	800
Частота обертання, об/хв	3500	3000	3000	3000	3700	4000
Пусковий струм, А	130	180	131	60	240	270
Номинальний струм, А	31	-	25,7	-	23,7	-
Електромеханічна постійна часу, с	$9,31 \cdot 10^{-3}$	$26 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Електромагнітна постійна часу, с	$0,32 \cdot 10^{-3}$	-	$0,26 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Перегрів у ном. реж. °С	113	-	133	-	104	-

Експериментальні дослідження виявили можливість зменшити індуктивність дроселів в LC-фільтрах підсилювачів потужності зі збереженням припустимого рівня пульсацій, створюваних силовими мостовими комутаторами, що працюють у режимі ШІМ на активно-індуктивне навантаження обмоток якорів електродвигунів.

У результаті цих досліджень постійну часу підсилювачів потужності зменшено до 0,3 мс у порівнянні з 8 мс. Ці доопрацювання введено у блоках БКД, що виробляються серійно, а також блоці БКД, що працює з двигуном підвищеної потужності ЕДМ600.

Застосування безколеторних двигунів постійного струму [14,15] має ряд переваг над звичайними колекторними двигунами:

- більше строк служби колекторних;
- висока швидкодія та динаміка, точність позиціонування;

- вищий КПД;
- швидкий набір максимальної швидкості обертання;
- більша потужність;
- не потребує додаткового охолодження;
- відсутнє іскріння;
- широкий діапазон змінювання частоти обертання;
- безконтактність та відсутність вузлів, що потребують технічного обслуговування;
- збільшений термін служби, висока надійність і підвищений ресурс роботи за рахунок відсутності електричних контактів, що ковзаються.
- низький перегрів електродвигуна, при роботі в режимах з можливими перевантаженнями
- більш низький рівень електромагнітних шумів.

В той же час слід відмітити і ряд недоліків безколеторних двигунів постійного струму:

- висока собівартість;
- не можливість використання без драйвера;
- проблемний ремонт, особливо при виконанні перемотки двигуна.

У таблиці 2.6 у графі БДПТ наведено технічні характеристики БДПТ, яким повинен відповідати двигун, що входить до складу стабілізатора.

2.4. Застосування нової моделі побудови стабілізатора

Технічне завдання на розробку першого українського стабілізатора передбачало створення стабілізатора, який за своєю моделлю побудови відповідав стабілізатору БМП-2. Враховуючи це, передбачалося, що стабілізатор СВУ-500 повинен був замінити стабілізатори 2Е36-1 (2Е36-4) які були , застосовані в БМП-2. Тому, в стабілізаторах СВУ-500, як і в їхніх прототипах 2Е36-1(4), було застосовано модель їх побудови з застосуванням принципу «силової» стабілізації.

Цей принцип стабілізації полягає в тому, що марка приладу обзору місцевості «жорстко» пов'язана з приводами вертикального та горизонтального каналів наведення, а наведення марки виконується з пульта управління стабілізатором, при цьому, необхідно повертати всю апаратуру по каналам ГН та ВН разом з корпусом, у якому вони розташовані та мають великі моменти інерції.

Це позначається як на точності наведення оператором від пульта, так і на точності стабілізації. Так, середня похибка стабілізації БМП-2 при русі машини по нормалізованій трасі не повинна перевищувати для каналу ГН та ВН – ≤ 1 т. д. [16,17].

Середня помилка стабілізації цифрового стабілізатора у складі головного виробу, яка була перевірена при проведенні Державних випробувань виробу, показала, що помилка по каналу ГН $\approx 0,42$ т.д., а по каналу ВН $\approx 0,98$ т. д., що відповідає вимогам технічного завдання. При цьому необхідно відзначити, що моменти інерції приводів наведення перевищують аналогічні параметри БМП-2.

З викладеного вище можна зробити висновок, що підвищення точності стабілізації (зменшення середньої помилки стабілізації до величини не більш 0,5 т. д.) у стабілізаторах, які побудовані за принципом «силової» стабілізації має значні конструктивні труднощі.

Таким чином, шляхом для підвищення точності стабілізатора є відмова від традиційної схеми так званої «силової» стабілізації. Для зменшення похибок стабілізації та підвищення точності до складу системи управління апаратурою виробу пропонується ввести оптико-електронний прилад обзору місцевості з стабілізованим полем зору (ОЕМ-ПСЗ), який буде передавати інформацію по інтерфейсних лініях зв'язку у вигляді цифрового коду на монітор оператора. В такому випадку, оператор буде виконувати наведення поля зору приладу ОЕМ-ПСЗ, що має масу та моменти інерції в десятки разів менші у порівнянні з корпусом, в якому розміщена апаратура наведення каналів ВН та ГН. Управління у цих машинах апаратурою наведення каналів ВН та ГН буде виконуватись по сигналами датчиків кутів, які знаходяться у приладі ПСЗ.

Така модель побудови має направлену дію на зниження амплітуд та кутових швидкостей коливань поля зору приладу обзору місцевості – стабілізація поля зору або «незалежна» стабілізація. Практично всі вироби (окрім БМП-3) були побудовані за моделлю «залежної» стабілізації поля зору приладу обзору місцевості, тобто ця модель передбачає «жорсткий» зв'язок поля зору приладу обзору місцевості, з приводами вертикального та горизонтального каналів наведення, що значно покращує умови спостереження за місцевостю через таке «жорстке» поєднання. Такий позитивний ефект від «жорсткого» поєднання призводить до великих похибок стабілізатора – коливань поля зору приладу обзору місцевості разом з приводами вертикального та горизонтального каналів наведення, у межах середньої похибки стабілізації відносно напрямку на об'єкт, за яким проводиться спостереження.

Побудова гіростабілізатора конструктивно може виконуватися на триступневих або двоступневих гіроскопах. Зовнішня рамка гіроскопа розміщується на одному або двох підшипниках, забезпечуючи обертання головного дзеркала приладу в горизонтальній площині (за курсом) на кут $n \times 360^\circ$ градусів.

У такий спосіб для системи стабілізації виділяються дві складові: це система навігації (СН) і система стабілізації (СС). Приладовий склад такої системи стабілізації наведений на рис. 2.4.

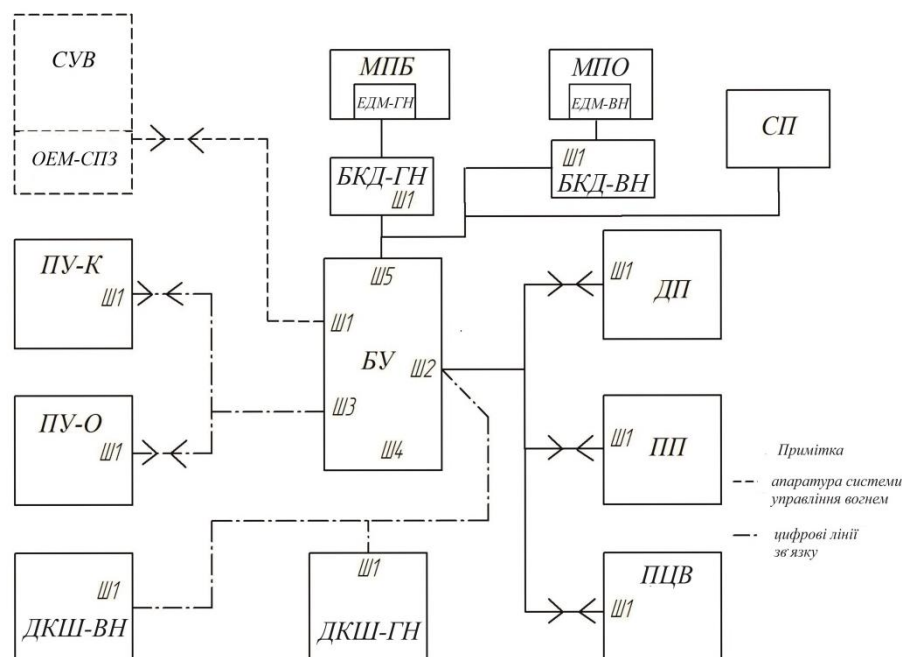


Рис. 2.4. Блок схема приладового складу стабілізатора з використанням оптико-електронного модуля з стабілізованим полем зору

На рис. 2.4 наведені позначення: СУВ – система управління виробом; ОЕМ-СПЗ – оптико-електронний модуль з стабілізованим полем зору; ПУ-К та ПУ-О – пульти управління стабілізатором; ДКШ-ВН, ДКШ-ГН датчики кутової швидкості по каналу ВН та ГН відповідно; БКД-ВН, БКД-ГН блоки керування двигунами по каналам ВН і ГН відповідно; БУ- блок управління стабілізатором, ПП – прилад приведення каналу ГН; ДП – датчик положення по каналу ВН, МПБ – механізм повороту горизонтального каналу; МПО – механізм підйому вертикального каналу; СП – статичний перетворювач (при необхідності), ПЦВ – прилад обзору місцевості.

На рис. 2.5 а) та б) наведені структурно-функціональні схеми привода ГН та привода ВН стабілізатора відповідно.

Введення ОЕМ-СПЗ до СУВ приводить до змін у блоці управління стабілізатора. У зв'язку з необхідністю перетворення (демодуляції й оцифровування) сигналів датчиків кута приладу ОЕМ-СПЗ (при необхідності) по каналах ГН і ВН до блоку управління введено пристрої гальванічної розв'язки,

що будуть оцифровувати ці сигнали з подальшою їхньою обробкою у обчислювачі мікропроцесора (МП).

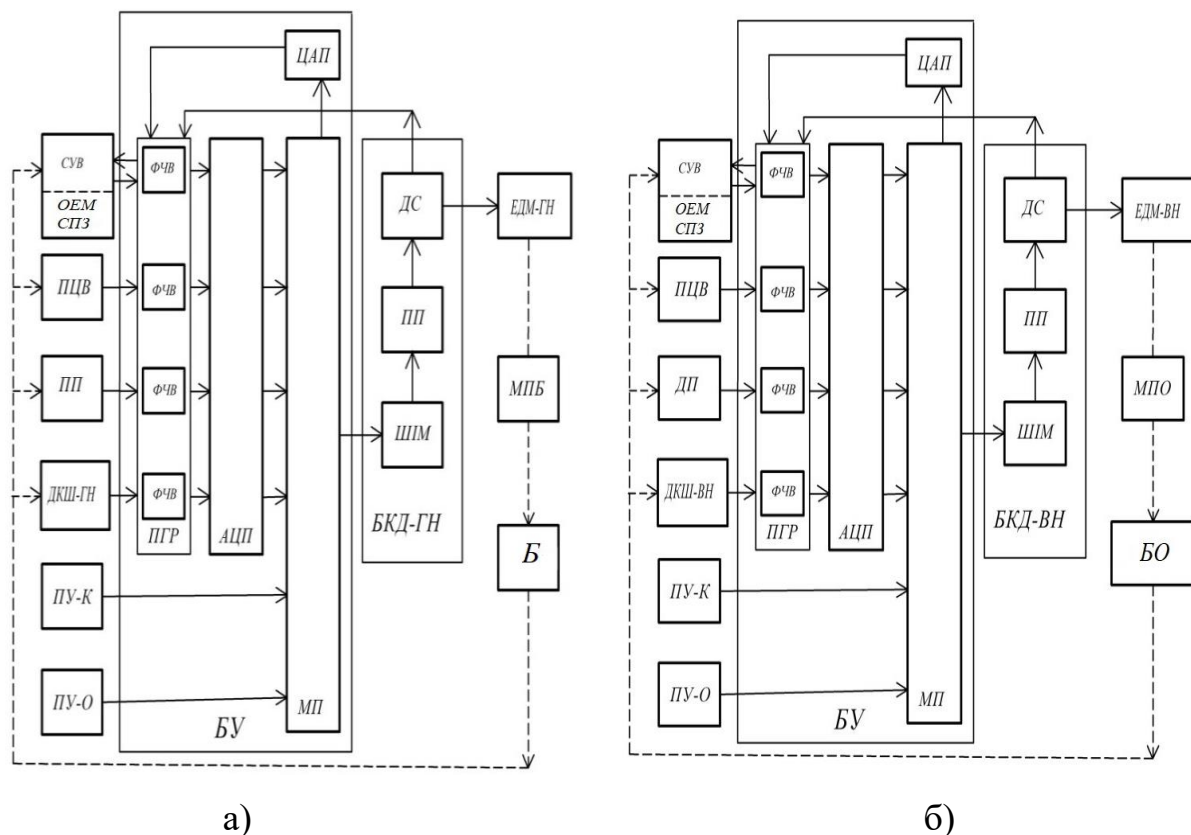


Рис. 2.5 . Структурні схеми приводів наведення стабілізатора:

а) приводу ГН

б) приводу ВН

де: Б – блок наведення горизонтального каналу, БО – блок наведення горизонтального каналу; СУВ – система управління виробом, ОЕМ-СПЗ – оптико-електронний прилад з стабілізованим полем зору, ПП – прилад приведення, ДКШ-ГН(ВН) – датчики кутової швидкості по каналам ГН та ВН; ПУ-К(О) – пульти управління стабілізатора; ПГР – пристрій гальванічної розв'язки, ФЧВ – фазочутливий випрямляч, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, МП – мікропроцесор, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, ДС – датчик струму, ПП – підсилювач потужності, ПЦВ – прилад приведення на обраний об'єкт на місцевості, ШІМ – широтно-імпульсний модулятор, БКД-ГН(ВН) – блок керування двигунами по каналам ВН та ГН, ЕДМ-ГН(ВН) – двигуни по каналам ГН та ВН, МПБ – механізм поворота горизонтального каналу, МПО – механізм підйому вертикального каналу.

Режим наведення з використанням сигналів OEM-ПСЗ (рис. 2.6) забезпечується зсувом лінії візування приладу за сигналами пульта оператора, які подаються на моментні датчики по осях зовнішньої й внутрішньої рамки гіроскопа OEM-ПСЗ. Під впливом цих моментів відбувається зсув гіроскопа OEM-ПСЗ у вертикальній і горизонтальній площині. Зсув гіроскопа OEM-ПСЗ приводить до зсуву вихідної осі (розвороту головного дзеркала) приладу.

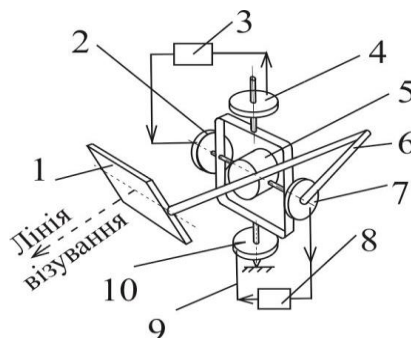


Рис. 2.6. Прилад з стабілізованим полем зору:

1 – стабілізоване дзеркало; 2, 10 – датчики моменту; 3, 8 – підсилювачі сигналу; 4, 7 – датчики кута; 5 – гіроскоп; 6 – шарнір

Враховуючи обмеження швидкості зсуву лінії візування приладу в межах $20^\circ/\text{с}$ наведення, з використанням приладу у складі СУВ, забезпечується в режимах «АВТ» та «УПР». Наведення у режимах «ПАВ» та «ЦВ» забезпечується за сигналами датчиків кутової швидкості ДКШ-ГН, ДКШ-ВН.

Аналогічно, перетворенням сигналу ДКШ-ГН та ДКШ-ВН (при використанні електромеханічних гіротахometrів) у ПГР блоку управління, перетворюються сигнали ПП, ДП, ПЦВ.

У БУ сигнал OEM-ПСЗ у цифровому вигляді підсумовується у вертикальному каналі із сигналами ДП у підсумовуючому підсилювачі. Сумарний сигнал (помилка стабілізації) подається на інтегратор компенсації статичної помилки. Для одержання необхідних характеристик привода ВН (помилка стабілізації та часу перехідного процесу) використовується сигнал зворотного зв'язку по швидкості зміни помилки стабілізації, яка одержується диференціюванням сигналу, помилки стабілізації диференціатором, а так само,

сигнал місцевого зворотного зв'язку по струму навантаження електродвигуна, сформований датчиком струму підсилювача БКД-ВН, диференціальним підсилювачем, підсилювачем датчика струму. Усі ці сигнали підсумовуються на суматорі підсилювача на виході БУ.

Модель побудови формування керуючих сигналів по каналу ГН збігається з моделью побудови каналу ВН, тільки зсув осі візування приладу з OEM-ПСЗ оцінюється з використанням сигналів приладу ПП.

Для зменшення похибок стабілізації та підвищення точності до складу системи управління виробом пропонується ввести оптико-електронний прилад обзору місцевості з стабілізованим полем зору (ПСЗ), який буде передавати інформацію по інтерфейсних лініях зв'язку у вигляді цифрового коду на монітор оператора. В такому випадку оператор буде виконувати наведення поля зору приладу ПСЗ, що має масу та моменти інерції в десятки разів менші у порівнянні з приводами вертикального та горизонтального каналів. Управління приводами вертикального та горизонтального каналів в цих виробах буде виконуватись за сигналами датчиків кутів, які знаходяться у приладі з ПСЗ.

Така модель побудови має направлену дію на зниження амплітуд та кутових швидкостей коливань поля зору приладу обзору місцевості – стабілізація поля зору або «незалежна» стабілізація. В стабілізаторах з «незалежною» стабілізацією інформація про збіг розузгодження між положенням стабілізованого поля зору приладу ПСЗ та апаратурою наведення горизонтального та вертикального каналу буде відображатись на екранах монітора оператора системи управління виробом.

Срединна похибка сучасних стабілізаторів 2Е52, що мають у своєму складі прилад з стабілізованим дзеркалом, не перевищує 0,4 т.д. [18].

Розглянемо функціонування приводу ВН режимі «ПАВ» за структурно-функціональною схемою стабілізатору з використанням OEM-ПСЗ (рис. 2.7). Основними елементами, що забезпечують роботу приводу ВН, є: ДКШ-ВН, пульт управління ПУ-О (ПУ-К), блок управління, до якого входять основні

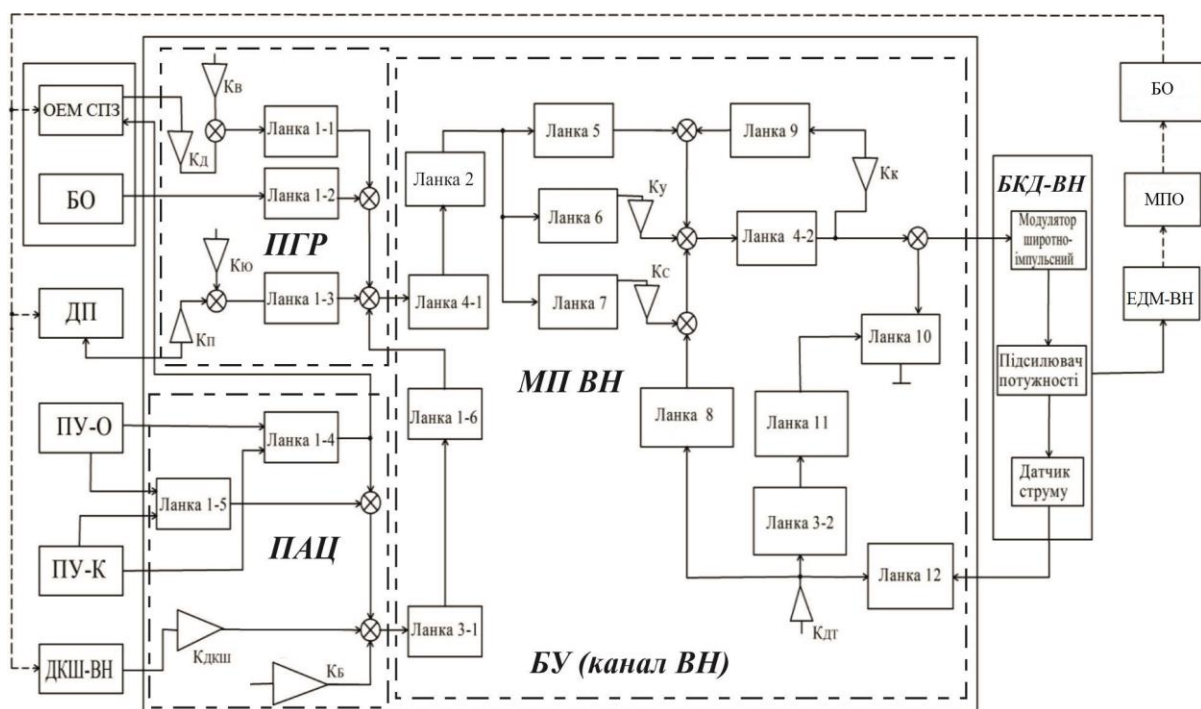


Рис. 2.7. Схема структурно-функціональна каналу ВН стабілізатору з використанням OEM-СПЗ

складові частини: ланка 2 (фазочутливий випрямляч), ланка 3-1 (інтегратор І-ВН), ланки 1-1 – 1-6 (ключові пристрої), ланка 5 (інтегратор компенсації статичної похибки), ланка 6 (підсилювач сигналу), ланка 7 (диференціатор), ланка 4-1 та 4-2 (підсумовуючі підсилювачі (ППК-ВН)), ланка 8 (підсилювач коригуючий), ланка 9 (коригуючий пристрій), ланка 12 (диференціальний підсилювач сигналу датчика струму), ланка 11 (нелінійна ланка з зоною нечутливості), ланка 10 (пристрій обмеження), підсилювач потужності БКД-ВН, датчик струму ДС, електродвигун ЕДМ-ВН; МПО – механізм підйому вертикального каналу, Б – блок наведення вертикального каналу.

Принцип дії привода ВН у режимі ПАВ заснований на тому, що при русі виробу разом з корпусом під дією зовнішніх сил відхиляються всі складові конструкції виробу від вихідного положення, захоплюючи за собою приводи наведення по каналам ГН та ВН.

Разом із корпусом виробу відхиляються приводи каналів ВН і ГН та відхиляється ДКШ-ВН, що установлений у приводі ВН. ДКШ-ВН виробляє

сигнал, пропорційний величині швидкості й відповідний (за фазою) напрямку відхилення каналу ВН у вертикальній площині. Сигнал із ДКШ-ВН, який пропорційний швидкості відхилення приводу ВН у вертикальній площині та відповідний (по фазі) напрямку відхилення приводу ВН у площині ВН, проходить через ланку з коефіцієнтом налаштування ДКШ, ланку 2-1 (фазочутливий випрямляч) та надходить на вхід ланки 3-1 (інтегратор). Інтегратор виробляє сигнал, пропорційний інтегралу швидкості, що відповідає величині кута відхилення корпусу від вихідного положення (*похибка стабілізації*). Сигнал з ланки 3-1 через ланку 1-3, ланку 4-1 (підсилювач підсумовуючий), ланку 2-2 (фазочутливий випрямляч), ланку 6 (підсилювач сигналу), коефіцієнт налаштування K_y , ланку 4-2 (підсилювач підсумовуючий) надходить на вхід широтно-імпульсного модулятора (ШІМ) блоку БКД-ВН, який підсилює його по потужності та потрапляє на обмотку якоря двигуна ЕДМ-ВН.

ЕДМ-ВН через механізм підйому МПО та зубчастий сектор повертає привод ВН у бік, протилежний відхиленню корпусу виробу, утримуючи його у заданному напрямку на об'єкт спостереження з похибкою у межах величини похибки стабілізації.

Для одержання необхідних динамічних характеристик привода ВН (мінімальної похибки стабілізації та якості перехідного процесу) використовується:

- сигнал зворотного зв'язку за швидкістю зміни похибки стабілізації, який отримується диференціюванням сигналу похибки стабілізації диференціатором (ланка 7);
- сигнал місцевого зворотного зв'язку по струму ЕДМ-ВН, сформований датчиком струму, ланкою 12 (диференціальним підсилювачем сигналу датчика струму), коефіцієнтом налаштування ДС, ланкою 8 (коригуючим підсилювачем);
- сигнал зворотного зв'язку по похибці стабілізації, що формується ланкою 9 (коригуючий пристрій) БУ.

Сигнали зворотного зв'язку по струму виконавчого двигуна, зворотного зв'язку по похибці та швидкості зміни похибки стабілізації сумуються на вході ланки 4-2 (підсумовуючого підсилювача) БУ.

Сумарний сигнал з виходу ланки 4-2 надходить на вхід БКД-ВН. Наведення апаратури виробу у вертикальній площині виконується за допомогою пультів ПУ-О (ПУ-К), сигнал з яких, через ланку 1-5 (ключовий пристрій), надходить на вхід ланки 3-1 (інтегратор І-ВН) та підсумовується з сигналом ДКШ-ВН. З виходу ланки 3-1 сигнал, що пропорційний сумі сигналів ДКШ та ПУ-К або ПУ-О, надходить на ланку (підсилювача підсумовуючого) і далі на блок БКД-ВН, ЕДМ-ВН.

Розглянемо функціонування приводу ВН в режимах «АВТ» та «УПР», де основними елементами, що забезпечують роботу у цьому режимі є: обертовий трансформатор (ОТ) датчика положення ДП, який механічно зв'язаний з віссю обертання БО, пульти управління ПУ-О та ПУ-К, та блок управління БУ, у складі: ланки 4-1 (підсумовуючий підсилювач), ланки 2 (фазочутливий випрямляч), ланки 6 (підсилювач сигналу), ланки 7 (диференціатор), ланки 5 (інтегратор компенсації статичної похибки), ланки 4-2 (підсумовуючий підсилювач), ланки 12 (диференціальний підсилювач), $K_{ДС}$ коефіцієнт налаштування датчика струму, ланка 8 (коригуючий підсилювач), ланка 3-2 (інтегратор датчика струму), ланка 11 (нелінійна ланка з зоною нечутливості), ланка 10 (пристрій обмеження), БКД-ВН, ЕМД-ВН, механізм підйому МПО.

Основою принципу дії стабілізатора в режимах «АВТ» та «УПР» є те, що привод ВН виконує стеження за стабілізованою лінією спостереження ОЕМ-ПСЗ. При цьому сигнал з ОЕМ-ПСЗ, пропорційний кутовому відхиленню ОЕМ-ПСЗ від стабілізованого положення, та сигнал з ОТ приладу ДП пропорційний кутовому положенню апаратури виробу, надходять в БУ на вхід ланки 4-1 (підсилювач сумуючий) та подаються на ланку 2-2 (фазочутливий випрямляч). Сигнал на виході ланки 2-2 пропорційний сигналу розузгодження датчика ДП, тобто ***похибці стабілізації***.

Сигнал з виходу ланки 2-2 через ланку 6, коефіцієнт налаштування K_y , надходить на вхід ланки 4-2 та далі на вхід БКД-ВН, Сигнал з БКД-ВН надходить на ЕДМ-ВН, який через механізм підйому діє на апаратуру в сторону зменшення розузгодження ОТ датчика ДП та підтримує БО у напрямку на об'єкт спостереження.

Для отримання необхідних характеристик приводу ВН у режимах «АВТ» та «УПР» (похибки стабілізації та часу перехідного процесу) використовуються:

- сигнал зворотного зв'язку по струму аналогічно роботі приводу у режимі «ПАВ»;
- сигнал зворотного зв'язку по швидкості змінювання похибки стабілізації.

Наведення апаратури у вертикальній площині виконується за допомогою пультів ПУ-О або ПУ-К, сигнали з яких через ланку 1-4 (ключовий пристрій) передаються на ОЕМ-СД, що забезпечує наведення лінії візування на об'єкт спостереження.

Функціонування приводу ГН у режимі ПАВ (рис. 2.8) забезпечує приладовий склад аналогічний приладовому складу приводу ВН з тією відмінністю, що як ДКШ використовується прилад ДКШ-ГН, замість приладу приведення ДП використовується датчик приведення ПП, підсилювач потужності БКД-ГН, виконавчий електродвигун ЕДМ-ГН та механізм повороту МПБ.

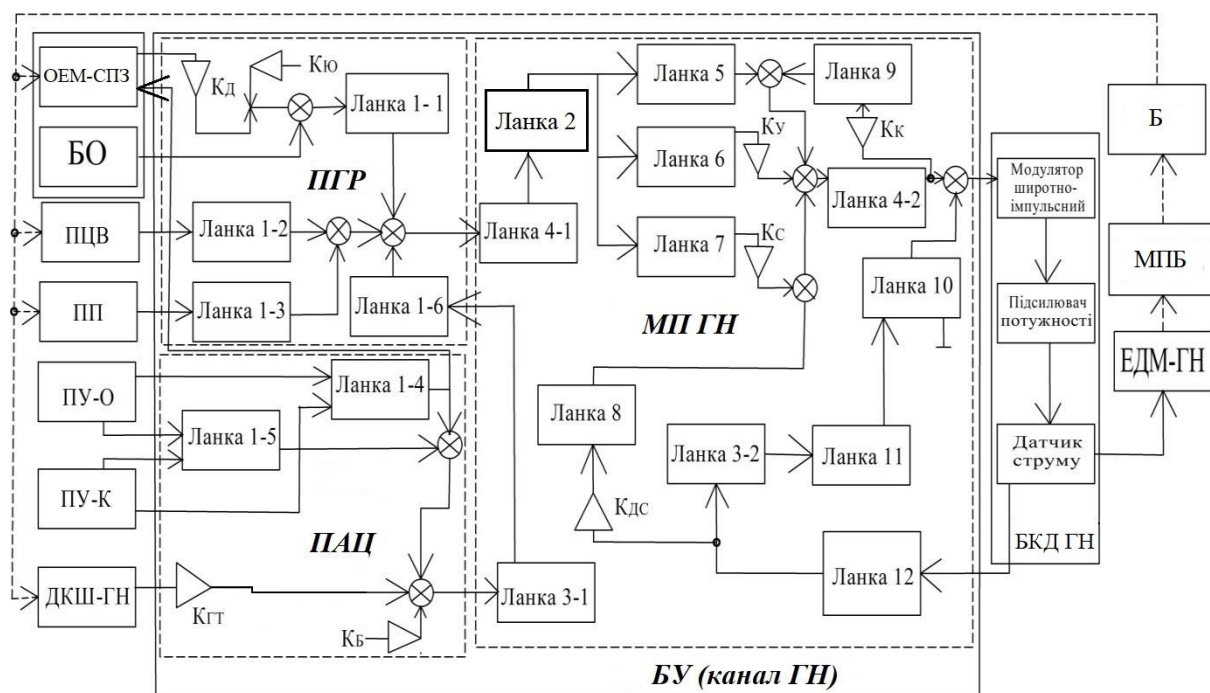


Рис. 2.8. Схема структурно-функціональна каналу ГН стабілізатору з використанням OEM-СПЗ

Позиційне та функціональне позначення окремих ланок каналів ВН та ГН на рис. 2.7 та 2.8 збережено, за винятком позиційних позначень ланок 1-1...1-6 (ключові пристрої), ланка 3-1 (інтегратор), ланка 3-2 (інтегратор сигналу датчика струму), ланки 4-1, 4-2 (підсилювачі підсумовувачі), ланка 5 (інтегратор компенсації статичної похибки), ланка 6 (підсилювач сигналу), ланка 7 (диференціатор), ланка 8 (підсилювач коригуючий), ланка 9 (коригуючий пристрій), ланка 10 (пристрій обмеження), ланка 11 (нелінійна ланка), ланка 12 (диференціальний підсилювач сигналу датчика струму).

Принцип дії приводу ГН при стабілізації та наведенні у режимі «ПАВ» подібний принципу дії приводу ВН у режимі «ПАВ», тільки при цьому ДКШ-ГН виробляє сигнал пропорційний швидкості відхилення блоку горизонтального наведення у площині ГН, за яком привід ГН за допомогою двигуна ЕДМ-ГН через поворотний механізм обертає апаратуру виробу в сторону зменшення похибки стабілізації та утримує апаратуру у напрямку на об'єкт спостереження.

Функціонування приводу ГН у режимах «АВТ» та «УПР» засновано подібно приводу ВН на сигналах з гіроскопічного датчика кута горизонтального

каналу, що входить до складу OEM-ПСЗ. Сигнал зворотного зв'язку по швидкості зміни похибки стабілізації, що отримується диференціюванням сигналу похибки, та сигнал зворотного зв'язку по струму забезпечують отримання необхідних характеристик ГН у режимі «АВТ» та «УПР».

2.5. Удосконалення методів вимірювання механічних параметрів, що впливають на функціонування стабілізатора

З впровадженням цифрових стабілізаторів змінювались методи їх перевірок у процесі виготовлення та випробувань, але методи контролю механічних параметрів виробу, до яких входили ці стабілізатори залишались такими, як і для аналогових стабілізаторів. Відомі методи контролю механічних характеристик виробів, до яких встановлюються стабілізатори, доволі трудомісткі, потребують додаткового оснащення, вимірювальних засобів. До цих параметрів відносяться моменти опору обертанню, точність встановлення ДКШ, моменти невірноваженості, люфти, жорсткість, з якою налаштовано стабілізатор. Невідповідність цих параметрів технічним вимогам призводить до труднощів при налаштуванні стабілізатора або призводить до погіршення технічних характеристик стабілізатора та, як правило, до недостатньої точності стабілізації при виконанні поставлених завдань.

Запропоновано нові методи контролю механічних характеристик виробу, які розглянемо у порівнянні з тими методами, що використовувались раніш.

2.5.1. Розробка методу вимірювання моментів опору обертання виробу

До механічних величин, що суттєво впливають на точнісні параметри та функціонування приладової системи стабілізації відноситься опір моменту обертання горизонтального каналу наведення (не більш 40 кгсм) та вертикального каналу наведення (не більше 30 кгсм).

Відома методика вимірювання моментів опору обертанню ($M_{опор}$ (кгсм)) для БМП-2 [16,17] полягала у тому, що вимірювання проводилось двома членами екіпажу динамометром, який закріплювали на кінці ствола виробу ($L \approx 1,5$ м), до

якого прикладалось зусилля від руки та фіксувалось його максимальне значення $P_{опор}$, при якому горизонтальний чи вертикальний канали плавно без ривків переміщувались у всьому діапазоні кутів наведення: $n \times 360^\circ$ для каналу ГН та від мінус 3° до 74° для каналу ВН. Максимальне значення моменту опору обертанню визначалось за формулою:

$$M_{опор} \text{ (кгсм)} = L \text{ (м)} \times P_{опор} \text{ (кгс)}, \quad (2.2)$$

Перевірки за допомогою цієї відомої методики потребували участі двох членів екіпажу, були трудомісткі, потребували додаткового оснащення (спеціальних технологічних настилів) для виконання робіт та виконувались у ручному режимі.

Для виключення з перевірок моменту опору обертанню ручних операцій та додаткового оснащення було розроблено новий метод. Для виконання цих вимірів було відкориговане програмно-алгоритмічне забезпечення (ПАЗ) шляхом введення окремої технологічної програми виміру струмів (режим контролю струмів або РКС) споживання для кожного з каналів ВН та ГН.

При виконанні перевірки оператор за допомогою ручок пульта управління стабілізатора задає плавне наведення у всьому діапазоні наведення відповідного каналу ВН або ГН та контролює за даними цифрового табло пульта управління значення струму споживання. При контролі струму споживання оператор фіксує його максимальне значення, яке має не перевищувати певних значень, що відповідають максимальному моменту опору обертання відповідного горизонтального або вертикального каналу.

За такою методикою пропонується також перевіряти невірноваженості башти при нахилах корпусу виробу по курсу та крену.

Як видно з описаної вище відомої методики, що виконувалась у ручному режимі з застосуванням динамометра, у новій запропонованій методиці необхідність додаткових технологічних настилів, динамометрів відсутня; ці роботи успішно виконує один оператор без виконання математичних розрахунків.

2.5.2. Розробка методу усунення взаємовпливу датчиків кутової швидкості каналу ВН на канал ГН

Для виставки датчиків кутової швидкості (ДКШ) відносно площин стабілізації додаткові вимоги не пред'являються, але обов'язковою є операція по усуненню взаємного впливу каналів ВН та ГН один на одного.

Роботи по усуненню взаємного впливу каналів є чисто механічними операціями. Для виконання їх у відомій методиці необхідно було увімкнути стабілізатор, навести марку прилада спостереження за місцевостю на віддалену точку (предмет), зафіксувати значення вертикального кута на екрані монітора. Потім, за допомогою ручок пульта управління стабілізатора, на максимальній швидкості 35 %/сек повернути привід горизонтального каналу на кут 360°, навести марку прилада спостереження за місцевостю по каналу горизонтального наведення на обрану раніше точку (предмет). По екрану монітора визначити вертикальний кут відхилення марки прилада спостереження за місцевостю. Відхилення марки прилада спостереження за місцевостю не повинне перевищувати 25 т.д. Якщо переміщення марки більше зазначеного вгору, то необхідно встановити шайбу (набір шайб) під верхню установочну поверхню ДКШ-ВН, якщо вниз, то - під нижню установочну поверхню ДКШ-ВН, у такий спосіб усунувши це переміщення. Необхідну товщину шайби (набору шайб) визначали за формулою:

$$S_{ВН} = 0,02 \times \Delta \text{ (мм)}, \quad (2.3)$$

де $S_{ВН}$ – товщина шайби (набору шайб), що необхідно встановити під ДКШ-ВН, мм; Δ – переміщення виробу у площині ВН по екрану монітора, т.д.

Аналогічно у відомій методиці проводились роботи по усуненню взаємовпливу каналу ВН на канал ГН. Тільки при цьому фіксувалось відхилення каналу ГН від похідної точки при наведенні вертикального каналу з максимальною швидкістю від нижнього до верхнього обмежувачів руху. Якщо воно більше 3 т.д. вліво, то – установкою шайб між кронштейном і верхньою настановною поверхнею ДКШ-ГН, а якщо величина переміщення приводу горизонтального каналу більше 3 т.д. вправо, то – домогтись зменшення

взаємовпливу установкою шайб між кронштейном та нижньою настановною поверхнею ДКШ-ГН. Необхідну товщину шайби (набору шайб) визначали за формулою:

$$S_{ГН} = 0,07 \times \Delta \text{ (мм)}, \quad (2.4)$$

де $S_{ГН}$ – товщина шайби (набору шайб), що необхідно встановити під ДКШ-ГН, мм; Δ – переміщення виробу в площині ГН по екрану монітора, т.д.

У новій запропонованій методиці для виключення всіх цих ручних операцій відкориговане ПАЗ цифрового блоку управління введенням до режиму налаштувань додаткової програми для усунення взаємовпливу каналів за допомогою коригувальних коефіцієнтів. Ці коригувальні коефіцієнти, у залежності від каналу та напрямку відхилення марки прилада спостереження за місцевістю вводяться оператором на цифровому дисплеї пульта керування, які надходять до обчислювача блоку управління стабілізатором та зменшують взаємний вплив до нульових або до допустимих значень [16].

Таким чином, як перевагу наведеної нової методики налаштувань перед відомою методикою, зазначимо повну відсутність механічних операцій, що виконувались за допомогою гайкових ключів та технологічних шайб.

2.5.3. Розробка методу вимірювання жорсткості стабілізатора

У відомій методиці вимірювання жорсткості приводів ВН та ГН – одного з трьох параметрів, що разом з несправністю наведення та кількістю перебігів при гальмуванні визначає точнісні характеристики стабілізатора, проводять два члени екіпажу за допомогою динамометра і слюсарного індикатора. Операція вимірювання жорсткості кожного з каналів виконується окремо та є громіздкою механічною роботою, результатом якої є вимірювання кута відхилення стабілізованої каналів ГН та ВН при прикладанні до них нормованого зусилля. Покажемо це.

У відомій методиці для перевірки жорсткості приводу ВН (рис. 2.9) було необхідно виконати наступні операції:

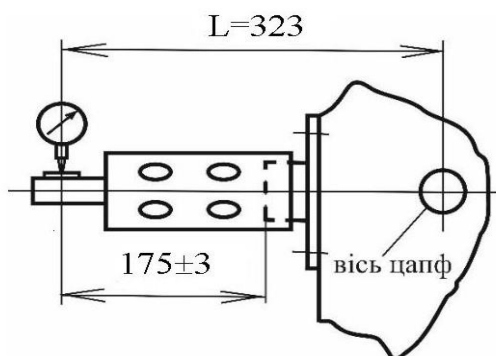


Рис. 2.9. Схема встановлення індикатора при вимірюванні жорсткості каналу ВН

– установити стійку з індикатором на башту так, щоб щуп індикатора торкався стабілізованої осі (один з елементів онструкції) на відстані 323 мм від осі обертання БО;

– прикласти зусилля не менше 20 кг у бік, протилежний виміру жорсткості, до хомута з гачком, який установлений на елемент конструкції на відстані $2,0 \pm 0,02$ м від осі обертання БО, та зменшити його до нуля вручну короткочасно і плавно;

– прикласти зусилля 15 кг у бік виміру жорсткості (подолання моменту опору обертання) до хомута через динамометр, а потім плавно збільшити його до 20 кг;

– зафіксувати різницю показань індикатора Δn за розподілами шкали слюсарного індикатора при цих зусиллях.

Жорсткість привода ВН ($G_{ВН} \geq 17$ кгм/т.д.) визначають за формулою:

$$G_{ВН} = \frac{3,23}{\Delta_n} \text{ (кгм/т.д.)} \quad (2.5)$$

де Δ_n - різниця показань індикатора в розподілах шкали (1 розподіл дорівнює 0,01 мм), повинна бути не менше 19 розподілів.

За аналогічною відомою методикою проводилось вимірювання жорсткості каналу ГН (рис.2.9) з тією різницею, що стійка з закріпленим індикатором встановлюється на шасі виробу так, щоб щуп індикатора торкався кронштейна прожектора на відстані 900 мм від осі обертання башти.

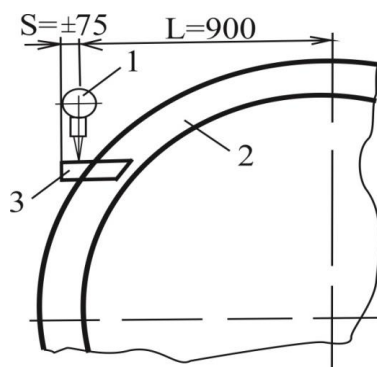


Рис. 2.10. Схема встановлення індикатора при вимірюванні жорсткості каналу ГН

Жорсткість привода ГН ($G_{ГН} \geq 40$ кгм/т.д.) визначали за формулою:

$$G_{ГН} = \frac{25}{\Delta_n} \quad (\text{кгм/т.д.}) \quad (2.6)$$

де Δ_n - різниця показань індикатора у розподілах шкали (1 розподіл дорівнює 0,01 мм) повинна бути не менше 63 розподілів.

У новому запропонованому методі зменшено трудомісткі ручні операції при вимірюванні жорсткості до мінімуму. У цьому методі виключено з перевірок технологічну стійку з індикатором та необхідність проведення математичних розрахунків за формулами (16,17).

Для цього на відстані 10 метрів від осі обертання Б та БО встановлюється щит перевірки, на якому закріплена тарировочна таблиця перевірки, що має шкалу розподілу у тисячних відстані (1 см = 1 т.д.).

При проведенні випробувань жорсткості вертикального або горизонтального каналу відлік відхилення осі візування від початкового положення визначаємо за кількості розподілів по тарировочній таблиці. Для отримання необхідної жорсткості приводу виміряне значення має не перевищувати встановлених значень.

Замість щита перевірки допускається використовувати значення кутових відхилень осі кожного з каналів по екрану монітора оператора, якщо точність відтворення кутів відхилення відповідає нормативним документам.

За наведеною вище методикою передбачено проводити вимірювання люфтів на моторних або ручних гілках каналів горизонтального та вертикального наведення стабілізатора.

Висновки до розділу 2

1. Проведений порівняльний аналіз із застосуванням методів математичного моделювання підтвердив доцільність застосування як сенсорів кутової швидкості твердотільних гіротахometrів, за рахунок більш високої смуги пропускання та підвищеної частоти інформаційного обміну, що в свою чергу призводить до зменшення похибок та покращення характеристик стабілізаторів;

2. З метою вивчення можливості заміни електромеханічних гіротахometrів ГТ46 на твердотільні гіротахometri та покращення характеристик точності стабілізатора було проведено моделювання з використанням датчика кутової швидкості (ДКШ) ГТ46. Проведено оцінку впливу смуги пропускання та дискретності обчислювальних операцій гіротахometrа ГТ46, ДКШ G20-075-100 зі смугою пропускання 100 Гц та ВОГ ВГ910Ф зі смугою пропускання 450 Гц;

3. Порівняння похибок стабілізації у вертикальному каналі при дискретності обчислень 1,7 мс і 1,0 мс показало, що при тривалості обчислень 1,0 мс стала похибка при розгоні і русі виробу з постійною кутовою швидкістю, у порівнянні з результатами при дискретності 1,7 мс, у два рази менша, а після дії імпульсних впливів БО при дискретності 1,0 мс повертається у вихідне положення з похибкою, яка не перевищує 0,1 кут. хв.;

4. Встановлено, що частота формування вихідних сигналів ДКШ має бути не менш 1000 Гц і смуга пропускання - не менш 100 Гц;

5. Запропонований метод зміни моделі побудови стабілізатора з застосуванням у контурі управління стабілізатором приладу з стабілізованим дзеркалом дозволяє перейти від «жорсткої» (залежної) стабілізації до незалежної стабілізації, що призводить до зменшення похибки стабілізації.

6. Перехід з урахуванням заміни електромеханічних гіротахometrів на твердотільні та зменшеним часом інформаційного обміну дозволить отримати

суттєве покращення точностних характеристик стабілізатора. Точність такого стабілізатора повинна досягти значень динамічної похибки стабілізації сучасного стабілізатора 2Е52 ($\leq 0,4$ т.д.) [12];

7. Запропоновано нові більш удосконалені методи вимірювання механічних параметрів модулів, що впливають на функціонування стабілізатора за безпосередньою участю приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. У порівнянні з відомою методикою по перевірці у новому методі, що використовує всі переваги цифрової техніки, зведено до мінімуму використання ручних трудомістких операцій, технологічного вимірювального інструменту, додаткового оснащення для виконання цих робіт та мінімізує кількість обслуговуючого персоналу, необхідного для виконання робіт.

Список літератури до розділу 2

1. Лепешинский И.Ю. Автоматические системы управления вооружением [Електроний ресурс] / И.Ю. Лепешинский, П.М. Варлаков, Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев // Учебное пособие. – Омск. – 2010. Retrieved from <http://mslstaryrussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773>.

2. Безвесільна О.М. Підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки// О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, Ю.В. Киричук // XIV Міжнародна науково-практична конференція «Наукова думка інформаційного віку 2018» Польща, Пшемисьль. – 07–15.03.2018. – С. 3–8.

3. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння. /Безвесільна О.М. В.П. Квасніков, В.Г. Цірук, В.В. Чиковані // Монографія. – НПО «Пріоритети». – Київ, ЖДТУ.– 2014. – С. 176.

4. Гиротахметри ГТ46-01. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html>.

5. Безвесільна О.М. Математична модель та технічні характеристики гіротахметра ГТ46 / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, Д.С. Козюков // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція «Технічні науки на сучасному етапі» (присвячена Дню науки). – Житомир. – 19.05.2018. – С. 92-93.

6. КВГ, ЦКВГ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://zelaz.ru/koriolisovyy-vibracionnyy-giroskop-kvg-ckvg.htm>.

7. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (2004), IEEE std.1431™, 69.

8. Волоконные датчики вращения ВГ***. Сводные ТУ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.

9. G20 to axis MEMS rate gyro. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.gladiatortechnologies.com>.

10. Сущенко О.А. Обзор современного состояния микроэлектромеханических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О.А. Сущенко, С.В. Карасев // *Електроніка та системи управління*. – №1(27), 2011. – С. 103-108.

11. Безвесільна О.М. Наукові, технологічні, організаційні та впроваджувальні основи створення нового комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих машин / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук Монографія. // НПО «Пріоритети». – Київ з грифом ЖДТУ. – 2015. – С. 176.

12. Liu, J. Signal Processing Technique for Combining Numerous MEMS Gyroscopes Based on Dynamic Conditional Correlation [Text] / J. Liu, Q. Shen, W. Qin // *Micromachines*. – 2015. – Vol. 6, Issue 6. – P. 684–689. doi: 10.3390/mi6060684.

13. Ji, X. Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array [Text] / X. Ji // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–6. doi: 1.

14. Юферов Ф.М. Электрические двигатели автоматических устройств. / Ф.М. Юферов // «Высшая школа». – Москва. –1976. – С.416.

15. Электрические машины автоматических устройств / М.М Кацман // Инфа-М. – Москва. – 2002. – С.264.

16. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БМП-2. Часть. 1. [Электронный ресурс] Москва. – 1987. – Режим доступа: <http://armyman/info/books/id-44.html>.

17. Кудрявцев А.М.. Электрооборудование бронетанковой техники. Стабилизаторы вооружения 2Э36: устройство и обслуживание [Электронный ресурс] / А.М. Кудрявцев, О.К. Уласевич, В.Н. Жеглов, В.Ю. Гумилев // Учебное пособие. Рязань. – 2013г. – С. 144. Режим доступа: <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.
18. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1 и 2. БМП-3. [Электронный ресурс] – Воениздат. МО Москва – 1998. – Режим доступа: <https://mil.in.ua/forum/viewtopic.php?t=893>.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ ТА КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ

Мета даного розділу надати відомості про розроблені математичні моделі основних компонентів та каналів управління стабілізатора [1,2].

При створенні математичної моделі були розроблені:

- математичні моделі кожного приладу та вузла, що входять до складу стабілізатора;
- математичні моделі блоку вертикального наведення (БО) та блоку горизонтального наведення (Б) з редукторами та двигунами;
- математичні моделі аналогового та цифрового трактів стабілізатора для вертикального та горизонтального каналів.

На підставі створених математичних моделей по каналам вертикального та горизонтального наведення та стабілізації були промодельовані всі режими роботи стабілізатора з урахуванням змінювання вхідних сигналів та регульованих параметрів у діапазонах, що передбачені конструкторською документацією на стабілізатор.

3.1. Математичні моделі основних вузлів та блоків стабілізатора

При моделюванні вирішувались наступні задачі:

- моделювання похибок відпрацювання кутової швидкості режимів наведення і стабілізації та дослідження процесів відпрацювання малих швидкостей при заданні їх з пульта управління;
- відпрацювання кутового положення стабілізатора при дії одиночних, багатократних збурень та збурень у вигляді гармонічного сигналу, який відповідає кутовому профілю типової траси;
- перевірка можливості забезпечення заданих вимог за умови обраного інтервалу дискретності (2,5 мс) та округлення значущих цифр у передавальних функціях основних ланок дискретних блоків управління до трьох значущих цифр;

- перевірка налаштувальних коефіцієнтів щодо можливостей налаштування каналів управління, та ін.

Для створення моделей та моделювання використовувалась обчислювальна система MATLAB. Стосовно нелінійних моделей, то з цією метою використовувався пакет Simulink. Використання цього пакету дозволило урахувати люфт приводу, що є важливим джерелом внутрішніх збурень системи управління взагалі.

Математична модель стабілізатора – це сукупність математичних моделей основних пристроїв, які входять до його складу [3-5]. Модель враховує динаміку процесів у пристроях та у часі. Фактично моделлю [6,7] є система диференціальних рівнянь, які забезпечують необхідну точність для вирішення поставленої задачі. Модель реалізована по замкнутій схемі. Вихідні сигнали моделі двигуна [8-10], що передаються через на редуктор блоку наведення, надходять на входи вимірювальних пристроїв – гіротахометра (абсолютна кутова швидкість, яка є сумою вихідної кутової швидкості та переносної кутової швидкості); тахогенератора (кутова швидкість блоку БО); датчика положення (кут блоку БО). Вихідні сигнали на пульт задаються користувачем. До математичної моделі входить також датчик струму, який є сукупністю коригуючих ланок, що покращують якість перехідного процесу сигналу, що передається [11-13].

Пульт управління призначений для формування керуючого впливу, що компенсує сигнал абсолютної кутової швидкості, яка надходить на гіротахометр [14,15]. Вхідним сигналом для пульта управління є кут повороту, що задається оператором. До складу математичної моделі каналу керування входить і ланка, що виконує функції послаблення.

Залежність сигналу пульта управління від вхідного кута повороту має наступний вигляд:

$$U = f(y) = U_0 \frac{1 - \cos\left(\frac{2a_0}{\varphi_0} \times i \times y\right)}{(1 - \cos a_0)}, \quad (3.1)$$

де, U – вихідна напруга, що знімається з потенціометрів горизонтального або вертикального каналів; U_0 – напруга потенціометрів відносно середньої точки, $U_0 = \pm(15 \pm 1,5)B$; γ – поточний кут повороту корпусу, що задається за допомогою ручок потенціометра, при цьому, його максимальне номінальне значення становить $30,6^\circ$; $\varphi_0 = 330^\circ$ – кут робочої зони; $a_0 = 41^\circ 15'$ – аргумент тригонометричної функції; $i = 5$ передатне відношення.

Максимальне значення вихідної напруги становить 12,96 В.

Робота математичної моделі пульта керування відображена на рис. 3.1 та рис. 3.2, при цьому, як впливи, що задають, використовуються сигнали синусоїдального й східчастого вигляду.

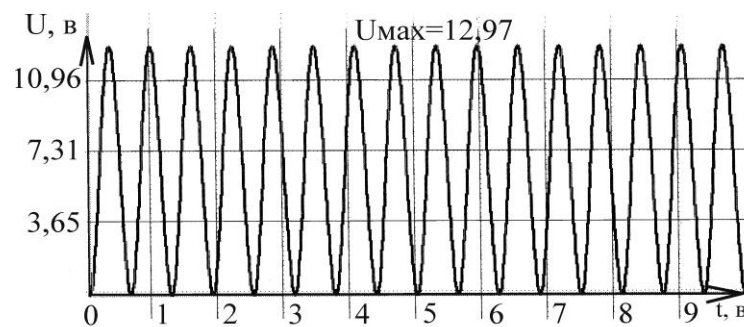


Рис. 3.1. Відпрацювання пультом управління впливу синусоїдальної форми, що задається

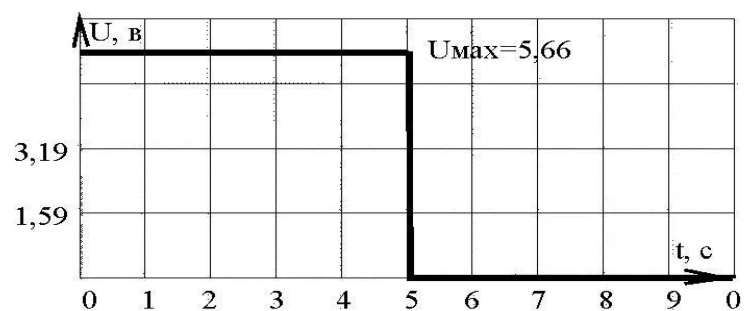


Рис. 3.2. Відпрацювання пультом управління впливу ступінчастої форми, що задається

Вигляд залежності вихідної напруги пульта від поточного кута повороту (характеристика пульта керування) відображено на рис. 3.1. Значення вихідного пульта керування подано на рис. 3.3.

Коефіцієнт ослаблення по каналу пульта управління, визначений за результатами лабораторних випробувань, орієнтовно становить 0,15.

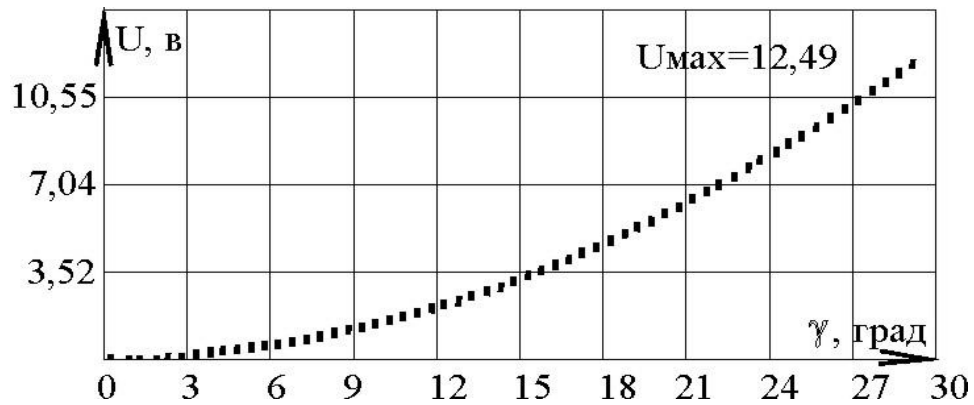


Рис. 3.3. Характеристика пульта управління

Гіротахометр призначений для виміру сигналу абсолютної кутової швидкості, яка є сумою вихідної кутової швидкості блоку БО й переносної кутової швидкості.

До складу математичного опису каналу гіротахометра [5,6] входять математичні моделі власне гіротахометра, демодулятора, ланки, що виконує функції ослаблення сигналу й Г-подібного фільтра, що є аперіодичною ланкою з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійної часу, розрахованої на підставі параметрів електричної схеми системи стабілізації.

Управління руху гіротахометра щодо вихідної координати α вихідної напруги U відображується в наступній формулі [16]:

$$\begin{cases} I_n \ddot{\alpha} + 2V \sqrt{I_n C_T} \dot{\alpha} + M_\alpha = M_\Gamma - \dot{M}'_\Gamma + M_{TP} + M_D - \omega_s I_n \\ U = K_D \alpha + U_0 \end{cases} \quad (3.2)$$

де, $V - (0,25 \dots 0,7)$ – коефіцієнт демпфірування; $C_T - (7,4 \dots 7,5)$ Нм/рад – жорсткість торсіону; $I_n - 3,376 \times 10^{-4}$ Нмс² (кгм²) – момент інерції підвісу;

$M_\Gamma - S \omega_\xi \cos \alpha$ – гіроскопічний момент; $S - 0,359$ Нмс (кгм²/с) – кінетичний момент при номінальній напрузі 36 В та частоті 395 Гц; ω_ξ – вимірювана кутова

швидкість; $M'_r - S\omega_\xi \cos\alpha$ – гіроскопічний момент, обумовлений дією кутової швидкості, нормальної до вимірюваної; ω_3 – кутова швидкість, нормальна до вимірюваної кутової швидкості ω_ξ ; $M_{TP} = -M_T \sin\dot{\alpha}$ – момент тертя, по величині, що не перевищує 2×10^{-6} Нм; $M_d = \zeta W$ – момент дебаланса; $\xi \leq 2 \times 10^{-5} \text{ Нс}^2$ – зсув, обумовлений дебалансом; W , м/с – лінійне прискорення, що викликає дебаланс; $\dot{\omega}_s$, рад/с – кутове прискорення щодо поздовжньої осі приладу; $K_d - 3,9 \text{ В/град}$ – вихідна характеристика індукційного датчика кута; $U_0 < 70 \text{ мВ}$ – нульовий сигнал датчика кута; M_α – момент, що враховує вплив гістерезису торсіону.

Особливістю моделі гіротахометра є облік нелінійності гістерезисного типу, внесеної торсіоном.

Розглянемо вираз для визначення моменту, що враховує вплив гістерезису торсіону. Позначимо кут α , при якому похідна $\dot{\alpha}$ змінює знак, символом α_0 .

При цьому можливі два варіанти:

1) похідна $\dot{\alpha}$ стає менше нуля ($\dot{\alpha} < 0$), тобто кут α починає зменшуватися. При цьому, залежно від діапазону зміни кута α , момент M_α визначається в такий спосіб [16]:

$$\begin{cases} M_\alpha = C_T \alpha_0 & \text{при} & \alpha_0 - K_r \times \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_0; \\ M_\alpha = C_T \alpha & \text{при} & \alpha < \alpha_0 & (1 - K_r); \end{cases} \quad (3.3)$$

2) похідна $\dot{\alpha}$ стає більше нуля ($\dot{\alpha} > 0$), тобто кут α починає збільшуватися. При цьому, залежно від діапазону зміни кута α , момент M_α визначається у такий спосіб:

$$\begin{cases} M_\alpha = C_T \alpha_0 & \text{при} & \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_0 + K_r \alpha_0; \\ M_\alpha = C_T \alpha & \text{при} & \alpha > \alpha_0 & (1 + K_r); \end{cases} \quad (3.4)$$

Коефіцієнт K_r характеризує величину гістерезису. Його значення можуть коливатися в діапазоні $0,0015 \leq K_r \leq 0,0075$.

Вихідні напруги гіротахометра, що отримані при однаковому постійному впливі, який задається, та при граничних значеннях коефіцієнта демпфірування представлені на рис. 3.4 та рис. 3.5.

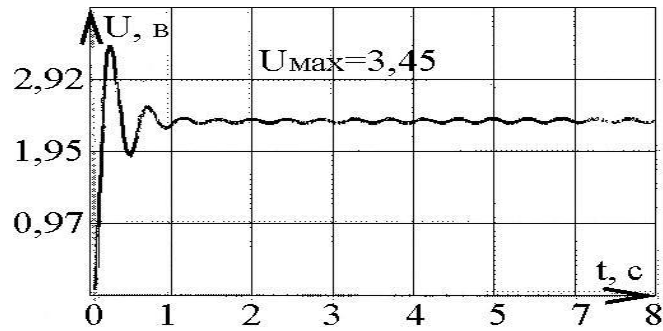


Рис. 3.4. Вихідний сигнал гіротахометра при впливі, що задається ($\omega=12,5$ °/с) та коефіцієнті демпфірування 0,25

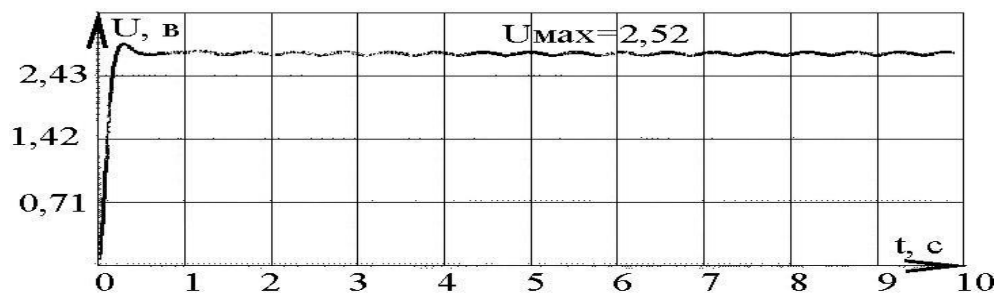


Рис. 3.5. Вихідний сигнал гіротахометра при впливі, що постійно задається ($\omega=12,5$ °/с) та коефіцієнті демпфірування 0,7

Реакція моделі гіротахометра на вплив, що постійно задається без врахування гістерезису відображена на рис 3.6. Облік впливу гістерезису з параметром $K_H=0,0075$ при тому впливі, що задається, характеризується рис. 3.7. При цьому, частота коливань, обумовлених гістерезисом, становить 25 Гц.

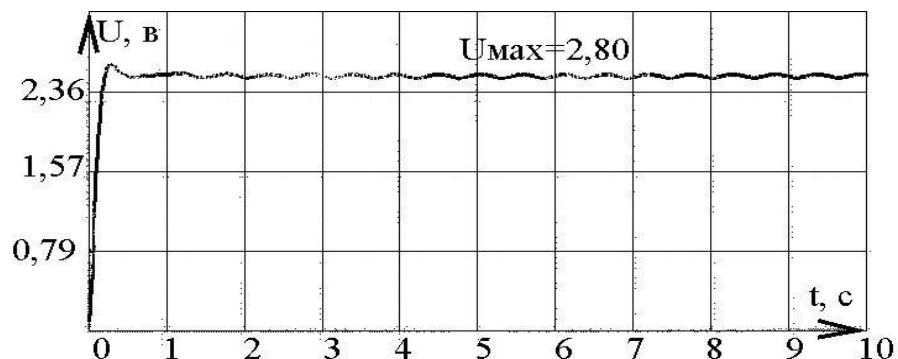


Рис. 3.6. Вихідний сигнал гіротахометра без врахування впливу гістерезису ($\omega=12,5$ °/с, коефіцієнт демпфування 0,5)

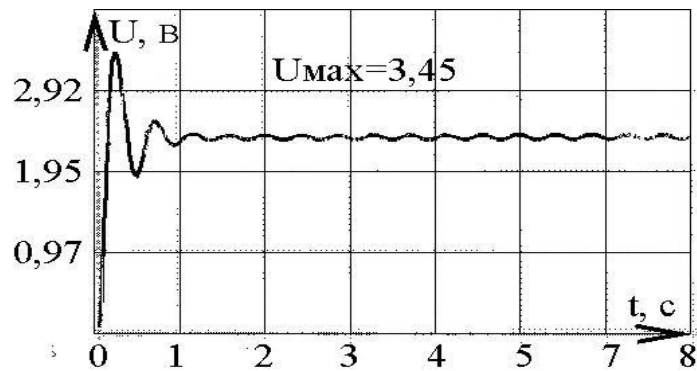


Рис. 3.7. Вихідний сигнал гіротахометра з врахуванням впливу гістерезису ($\omega=12,5$ %/с, коефіцієнт демпфування 0,5)

Далі в моделі каналу гіротахометра враховується наявність порогового пристрою, що забезпечує обмеження рівня вихідного сигналу гіротахометра до 12 В, та напруга зсуву, яка підсумовується з вихідним сигналом гіротахометра.

З метою максимального наближення до реальних схемо-технічних рішень у модель каналу гіротахометра включена модель однополуперіодного демодулятора, блок-схема якої представлена на рис. 3.8.

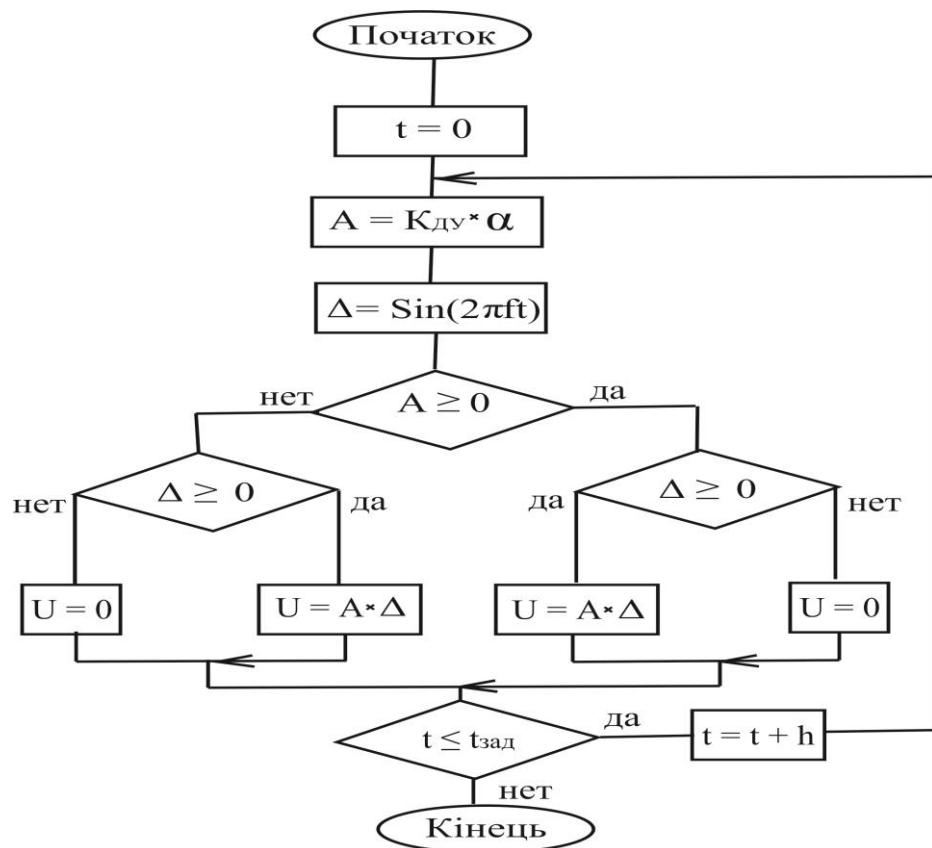


Рис. 3.8. Блок-схема однополуперіодного демодулятора

Результати роботи моделі демодулятора при постійному впливі, що задається, представлені на рис. 3.9, 3.10.

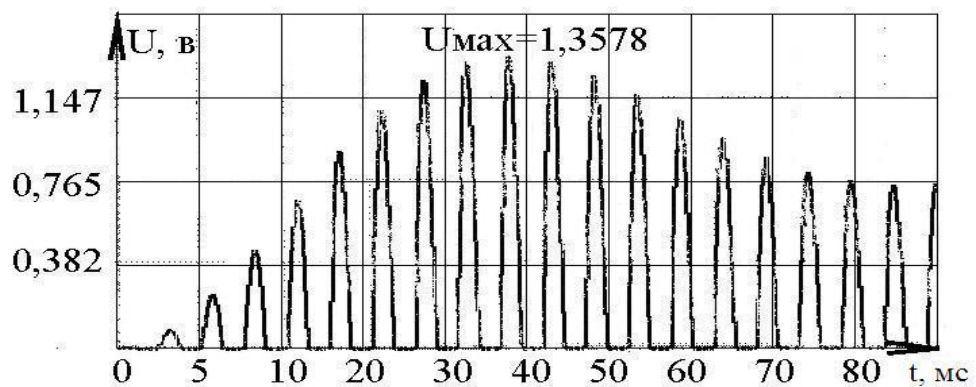


Рис. 3.9. Вихідний сигнал однополуперіодного демодулятора при постійному впливі, що задається $\omega = 5^\circ/\text{с}$

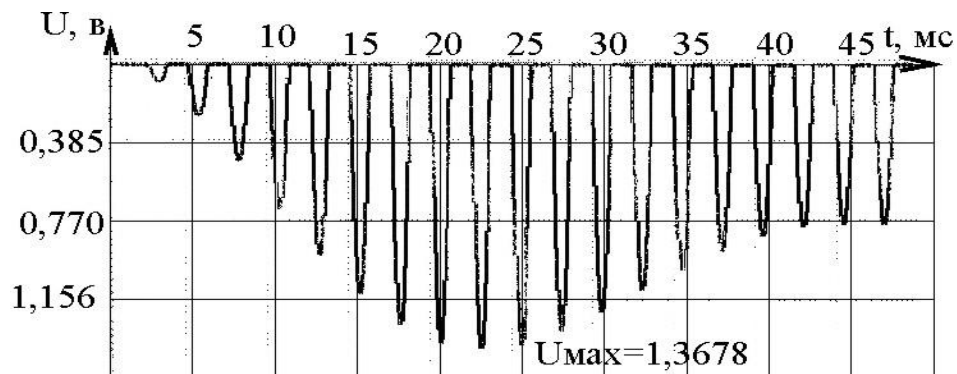


Рис. 3.10. Вихідний сигнал однополуперіодного демодулятора при постійному впливі, що задається $\omega = 5^\circ/\text{с}$

Попереднє значення коефіцієнта ослаблення по каналу гіротахометра прийняте рівним 0,7 і буде уточнюватись на етапі ідентифікації моделі за результатами лабораторних випробувань.

Далі в модель гіротахометра вводиться Г-подібний фільтр, який є аперіодичною ланкою з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійної часу, що визначена за параметрами електричної схеми:

$$T = RC = 10^3 \times 0,15 \times 10^{-6} = 0,00015 \text{ с.} \quad (3.5)$$

До особливостей Г-подібного фільтра відноситься формування передніх і задніх фронтів моделюючих коливань із різними постійними часу. При цьому, для переднього фронту постійна часу приймається розрахунковою, а для заднього фронту – розрахункове значення трохи збільшується для того, щоб забезпечити вповільнене зменшення амплітуди сформованого сигналу. Порівняльна характеристика моделюючих коливань при однакових і різних постійних часу ілюструється рис. 3.11 та рис. 3.12.

Вихідні сигнали керуючих впливів, що сформовані в каналах пульта управління та гіротахometра, підсумовуються з коефіцієнтами 1 і 0,42, відповідно, й надходять на інтегратор, постійна часу якого становить:

$$T = R \times (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) = 10 \times 10^3 \times 44 \times 10^{-6} = 0,44 \text{ с} \quad (3.6)$$

Вихідний сигнал інтегратора після обмеження за рівнем 9 В надходить на вхід суматора для формування керуючого впливу.

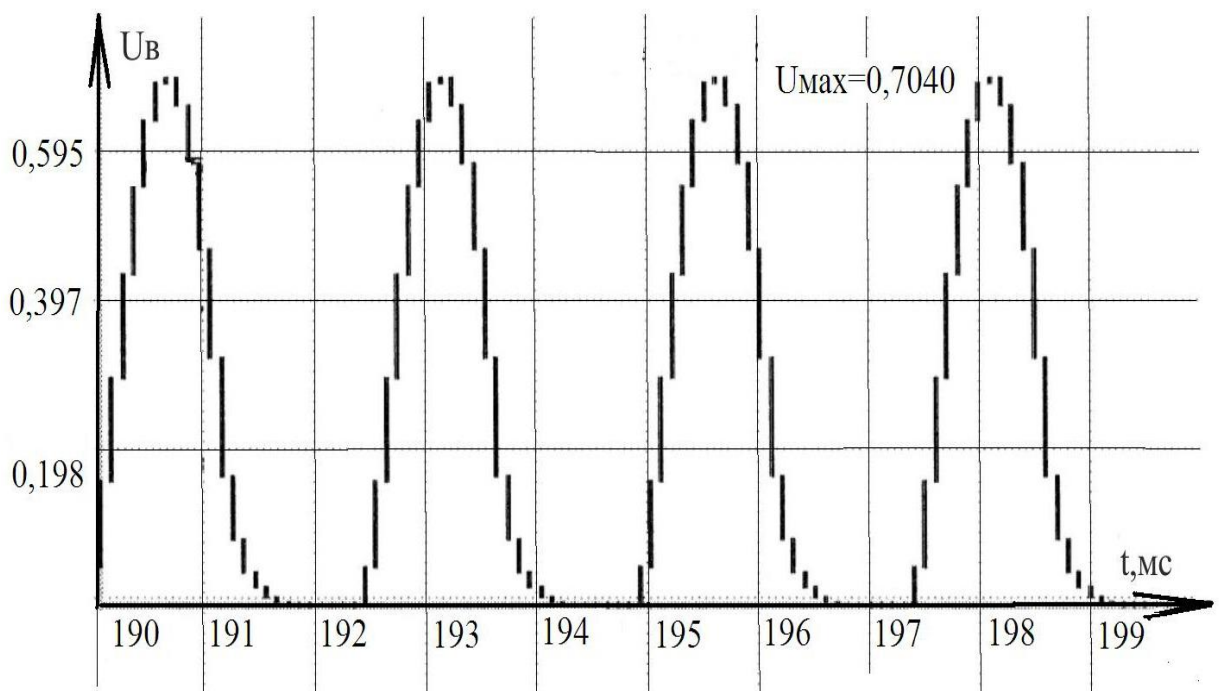


Рис. 3.11. Вихідний сигнал у ланці гіротахometра при постійному впливі, що задається $\omega = 5 \text{ } ^\circ/\text{с}$ та однакових постійних часу Г-подібного фільтру

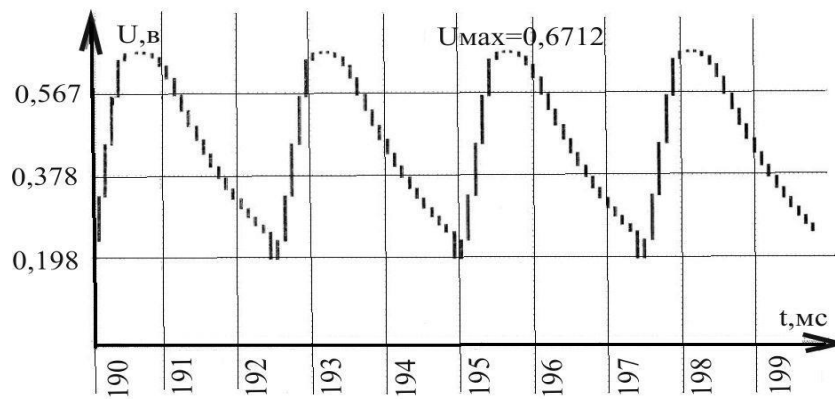


Рис. 3.12. Вихідний сигнал в ланці гіротахометра при постійному впливі, що задається $\omega=5$ °/с та різних постійних часу Г-подібного фільтру

Вхідним сигналом для моделі **датчика положення** є кут, що, утворюється при поворотах блоку БО. Сигнал датчика положення описується виразом: $U_{дп} = \sin \varphi_{бо}$ де, $U_{дп} = 20$ В, $\varphi_{бо}$ – кут блоку БО.

Далі при проходженні по каналу сигнал послабляється з коефіцієнтом ослаблення 0,17 і надходить на Г-подібний фільтр, який є аперіодичною ланкою постійною часу:

$$T = RC = 10 \times 10^3 \times 10^{-6} = 0,01 \text{ с.} \quad (3.7)$$

Вхідний канал сигналу датчика положення надходить на суматор для формування керуючого впливу.

У **суматорі** здійснюється формування закону керування залежно від режиму роботи системи стабілізації. У загальному випадку керуючий вплив може формуватися за сигналом, що надходить від інтегратора та сигналу, який сформований в ланцюзі каналу датчика струму. У деяких режимах замість сигналу інтегратора використовується сигнал датчика положення. Як прохідні коефіцієнти підсилення для перерахованих сигналів обираються задані в технічному завданні значення (21,5; 11; 0,6 і 2,7, відповідно). Остаточний добір коефіцієнтів підсилення є однією з основних завдань моделювання системи стабілізації.

Вихідний сигнал суматора обмежується рівнем 9 В, демодулюється (робота двухполуперіодного демодулятора ілюструється рис. 3.13) та надходить на підсилювач напруги, який є аперіодичною ланкою з коефіцієнтом підсилення (27,6) В та постійної часу, розрахункове значення якої становить:

$$T = RC = 2,2 \times 10^{-3} = 0,0022 \text{ с} \quad (3.8)$$

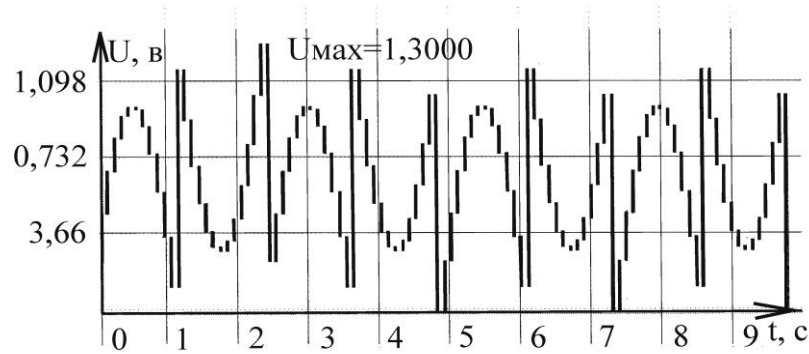


Рис. 3.13. Вихідний сигнал двополуперіодного демодулятора при постійному впливі збудження $U = 1 \text{ В}$, що задається

Необхідно відзначити, що через відмінності лабораторних випробувань, за якими проводиться ідентифікація параметрів моделі, від умов експлуатації, як постійна часу приймається значення $T = 0,01 \text{ с}$. Вихідний сигнал підсилювача напруги без обліку й з урахуванням демодулятора представлений на рис. 3.14, 3.15, відповідно.

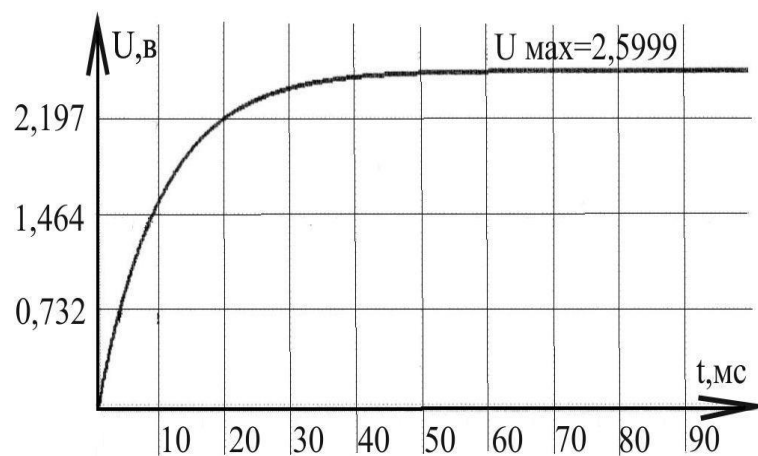


Рис. 3.14. Вихідний сигнал підсилювача без врахування демодулятора при постійному впливі збудження $U = 0,1 \text{ В}$, що задається

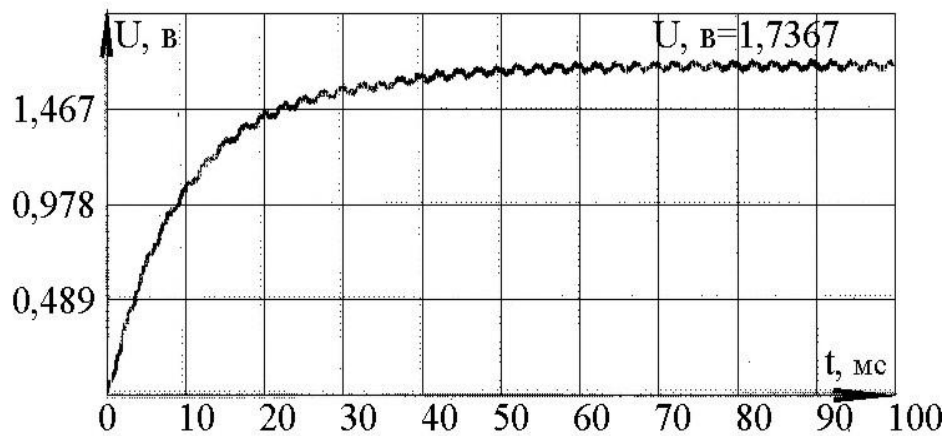


Рис. 3.15. Вихідний сигнал підсилювача з врахуванням демодулятора при постійному впливі збудження $U = 0,1$ В, що задається

Перед тим, як потрапити на вхід моделі широтно-імпульсного модулятора, вихідний сигнал підсилювача напруги зазнає наступних операцій:

- 1) інвертування (необхідність виконання цієї операції була встановлена при перевірці відповідності фазування моделі реальній системі стабілізації);
- 2) обмеженню вихідної напруги за рівнем 6 В;
- 3) формуванню зони нечутливості вихідної напруги 0,1 В;
- 4) обнуленню вихідної напруги при досягненні певних значень кута, сформованого блоком озброєння, (характеристики зазначених нелінійностей представлені на рис. 3.16).

Модель **широтно-імпульсного модулятора** реалізує формування послідовності імпульсів, амплітуда й тривалість яких визначається на підставі наступних співвідношень:

$$U_{\text{ШИМ}} = (27 - 1 - 0,04 \times |I|) \text{sign} U_{\text{ВХ}}, \quad (3.9)$$

де, $U_{\text{ВХ}}$ – вхідна напруга; I – струм якоря двигуна.

$$t_{\text{ШИМ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{оп}}} \cdot \tau, \quad (3.10)$$

е, $U_{\text{ВХ}}$ – вхідна напруга; $U_{\text{оп}}$ – опорна напруга широтно-імпульсного модулятора, що дорівнює 6 В; τ – тактова частота широтно-імпульсного модулятора, що дорівнює 2,5 мс.

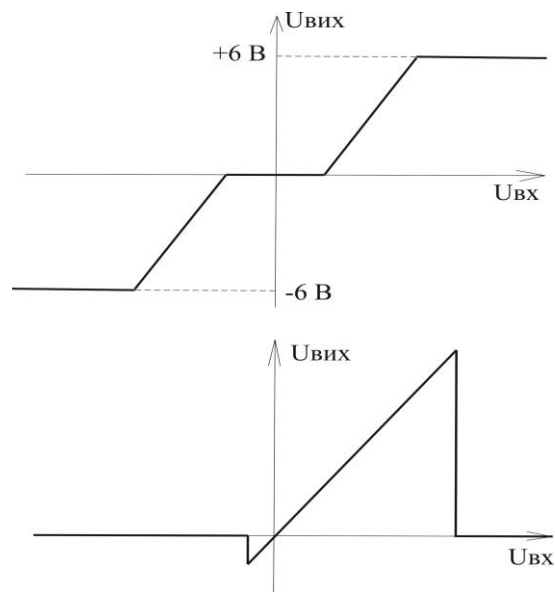


Рис. 3.16. Нелінійні ланки ланцюга підсилювача напруги

При створенні широтно-імпульсного модулятора враховувалося те, що розрахункова тривалість формованого імпульсу не може перевищувати його заданої тактової частоти.

Результати роботи моделі широтно-імпульсного модулятора представлені на рис. 3.17.

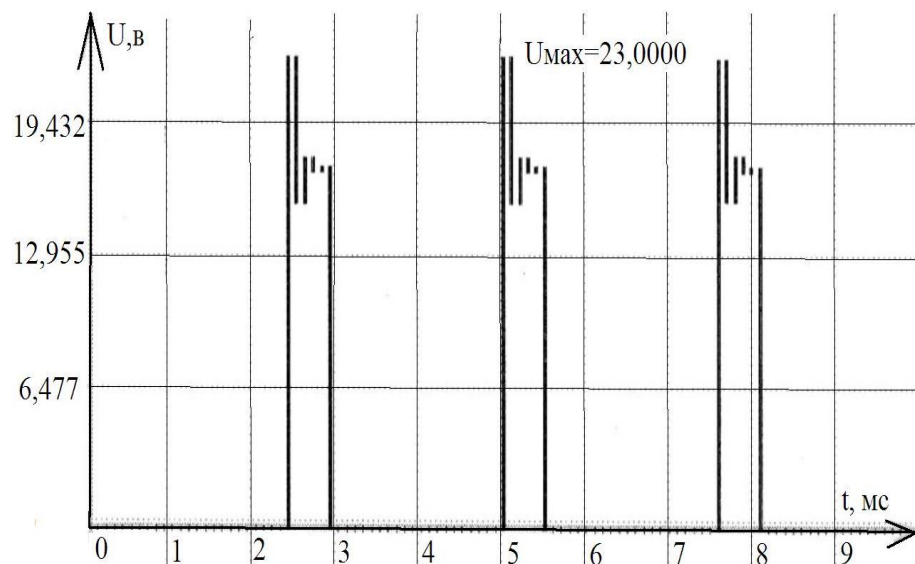


Рис. 3.17. Вихідний сигнал широтно-імпульсного модулятора при постійному впливі $U = 1,5 V$, що задається

Формування струму якоря двигуна описується наступною формулою:

$$I = \frac{U_{\text{ШМ}} - C_e \dot{\phi}_{\text{ДВ}}}{R_{\text{об}}}, \quad (3.11)$$

де, $U_{\text{ШМ}}$ – вихідна напруга широтно-імпульсного модулятора; C_e – постійна е.р.с.; $R_{\text{об}}$ – опір обмотки якоря; $\dot{\phi}_{\text{ДВ}}$ – кутова швидкість двигуна (сигнал, що забезпечує зворотний зв'язок).

Отримане значення струму якоря двигуна надходить на широтно-імпульсний модулятор, а також на коригувальну ланку, яка є аперіодичною ланкою з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійної часу, що дорівнює 0,01 с.

Відкоригований струм якоря двигуна надходить безпосередньо на модель двигуна, а також у канал датчика струму. Каналом датчика струму є послідовність наступних ланок:

- 1) ланки посилення ($K = 0,11$);
- 2) аперіодичної ланки з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійної часу, що дорівнює $T = 0,003$;
- 3) аперіодичної ланки з коефіцієнтом підсилення $K = 0,1$ та постійної часу $T = 0,001$;
- 4) форсуючої ланки з постійної часу $T = 0,02$;
- 5) нелінійної ланки, яка є обмеженням за рівнем 9 В.

Сформований вихідний сигнал струму надходить на суматор для формування сумарного керуючого впливу.

3.2. Математичні моделі горизонтального та вертикального каналів стабілізатора

Структурно-функціональна схема та електрична схема побудови стабілізатора виконані таким чином, що стабілізатор практично складається з двох незалежних каналів за винятком однієї команди, яка формується у горизонтальному каналі та є обов'язковою для виконання у вертикальному каналі.

Тому, за деяким припущенням, математична модель стабілізатора може бути представлена у вигляді двох незалежних математичних моделей:

- математичної моделі вертикального каналу наведення;
- математичної моделі горизонтального каналу наведення.

Математичні моделі вертикального та горизонтального каналів розроблялись з урахуванням ряду особливостей, а саме:

однакових для двох каналів:

- 1) Передача обертання від двигунів на БО та Б виконується через редуктори, математичні моделі яких побудовані з обов'язковою наявністю люфтів;
- 2) Струм в якірних обмотках двигунів (сигнал зворотного зв'язку по струму – вихідні сигнали моделі двигуна) використовується для формування законів управління разом з інформацією про абсолютну кутову швидкість;
- 3) Управління двигунами приводів ВН та ГН виконується за допомогою імпульсів з широтно-імпульсних модуляторів;

різних для двох каналів:

- 1) В математичній моделі тільки вертикального каналу враховується пружна ланка за рахунок пружини, що зменшує невірноваженість каналу;
- 2) В математичній моделі враховується напруга в якірній обмотці двигуна тільки вертикального каналу (сигнал зворотного зв'язку по напрузі – вихідний сигнал двигуна) в горизонтальному каналі цей сигнал не обчислюється;
- 3) Кут розвороту горизонтального каналу вимірюється приладом приведення (прилад ПП), сигнал з якого враховується у математичній моделі горизонтального каналу;
- 4) Кут розвороту вертикального каналу вимірюється датчиком положення (прилад ДП), сигнал з якого враховується у математичній моделі вертикального каналу;
- 5) Абсолютна кутова швидкість вертикального каналу визначається швидкістю переносного кутового руху корпусу та відносного кутового руху вертикального каналу;

б) Абсолютна кутова швидкість горизонтального каналу визначається швидкістю переносного кутового руху корпусу та відносного кутового руху горизонтального каналу.

На підставі наведених особливостей і математичні моделі каналів наведення стабілізатора можуть містити такі відмінності.

Математичні моделі вертикального та горизонтального каналів відрізняються одна від одної лише деякими складовими та чисельними значеннями, що знаходять відображення у передавальних коефіцієнтах окремих обчислювальних ланок.

По цьому, у роботі наведемо опис математичної моделі вертикального каналу, як найбільш функціонального, а потім розглянемо особливості математичної моделі горизонтального каналу.

Математична модель модуля (рис 3.18) є сукупністю наступних пристроїв: горизонтального (вертикального) каналів, блоку управління та двигуна вертикального наведення (двигуна горизонтального наведення) [7,8].

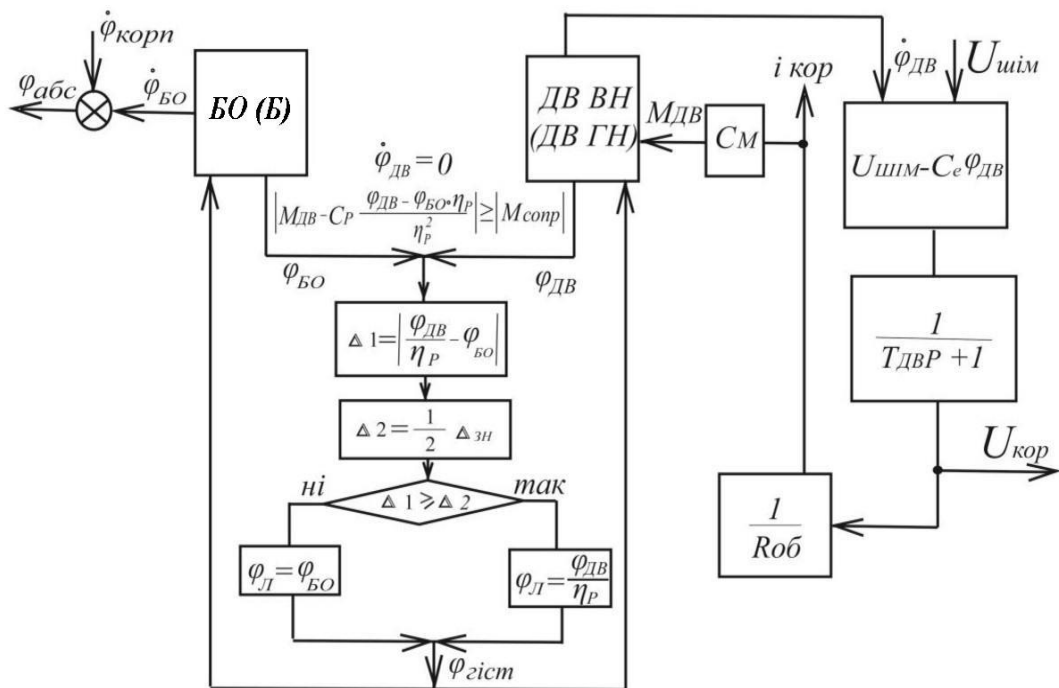


Рис. 3.18. Блок-схема математичної моделі модуля
(горизонтального або вертикального каналів)

Математична модель двигуна [5] складається з двох складових - блоку перетворювача, який містить вузол формування струму двигуна з урахуванням постійної часу двигуна, та блоку, що відтворює механічну частину двигуна. Вхідний параметр для двигуна – широтно-імпульсна напруга $U_{ШИМ}$, що сформована в блоці управління, та містить інформацію про кутову швидкість двигуна $\dot{\phi}_{ABC}$, яку необхідно розвинути для створення противо-е.р.с.

Вихідні параметри блоку перетворювача:

– горизонтального або вертикального каналів струм якоря двигуна, який формує управляючий момент двигуна та потрапляє на формування зворотного зв'язку по струму;

– напруга на обмотці двигуна, що використовується для формування зворотного зв'язку по напрузі та визначає рівень струму в обмотці двигуна.

$$U_{OB} = U_{ШИМ} - C_{ЕРС} \dot{\phi}_{ДВ} \quad . \quad (3.12)$$

Постійна часу двигуна враховується проходженням сигналу U_{OB} через аперіодичну ланку з одиничним коефіцієнтом посилення $\frac{1}{T_я p + 1}$, після чого напруга U_{OB} набуває виразу:

$$T_я p U_{КОР} + U_{КОР} = U_{OB} \quad . \quad (3.13)$$

де, $T_я = 0,0015 \text{ с}$ – постійна часу якоря двигуна; $U_{КОР}$ – вихідний сигнал аперіодичної ланки.

Подальший шлях сигналу – $U_{КОРП}$ проходить через ланку зворотного зв'язку по напрузі, ланку $1/R_{OB}$, ланку зворотного зв'язку по струму ($I_{КОР}$) ланку, що містить постійну моменту навантаження на вал двигуна C_M .

В остаточному підсумку маємо вигляд управляючого моменту двигуна:
 $M_{ДВ} = C_M i_{КОР}$.

Механічну частину моделі двигуна (рис.3.18) описує диференціальне рівняння:

$$J_{ДВ} \ddot{\phi}_{ДВ} + M_{СОПР} s \lg \dot{\phi}_{ДВ} = M_{ДВ} - C_p \frac{\phi_{ПСТ} - \phi_{БО} n_p}{n_p^2} \quad (3.14)$$

де, $M_{дв}$ – момент управління двигуном; $M_{сопр}$ – момент опору обертанню башти;

C_p – жорсткість редуктора; n_p – передавальне число редуктора;

$J_{дв}$ – момент інерції ротора двигуна; $\varphi_{дв}$ – кут повороту ротора двигуна;

$\varphi_{гист}$ – кут повороту ротора двигуна з урахування нелінійності гістерезисного типу, зумовленої наявністю люфту двигуна; $\varphi_{бо}$ – кут повороту вертикального каналу (об'єкта управління).

З рис. 3.18 видно, що вхідними параметрами моделі механічної частини двигуна є момент управління двигуном – $M_{дв}$, кут повороту блоку вертикального наведення – $\varphi_{бо}$ та кут повороту ротора двигуна, що пропущений через нелінійну ланку гістерезисного типу, – $\varphi_{гист}$, за допомогою яких формується момент навантаження на валу двигуна. Вихідний параметр моделі – кут повороту валу двигуна. Для врахування у моделі двигуна нелінійності гістерезисного типу кут повороту ротора двигуна проходить через нелінійну ланку (рис. 3.18), де на виході одержується сигнал $\varphi_{гист}$, в якому також враховується дія моменту невірноваженості $M_{нр}$.

До особливостей математичної моделі механічної частини двигуна відносяться:

1) Врахування нелінійності, що викликана люфтом привода, для чого кут повороту двигуна $\varphi_{дв}$ (вихідний сигнал математичної моделі двигуна) пропускається через нелінійну ланку. Блок схема формування кута повороту двигуна $\varphi_{дв}$ з врахуванням люфту наведена на рис. 3.18;

2) Взаємозв'язок механічної частини двигуна та об'єкта управління пропускається через редуктор. Цей взаємозв'язок забезпечується введенням у диференціальне рівняння кута повороту вертикального (горизонтального) каналу;

3) З метою встановлення адекватності моделі реальній роботі двигуна вводиться обнуління прискорення обертання двигуна при його нульовій

швидкості та виконання визначених співвідношень між моментами, що діють на двигун. Ці умови наведені на рис. 3.17 та мають вигляд:

$$\left| M_{дв} - C_p \frac{\varphi_{л} - \varphi_{бо} n_p}{n_p^2} \right| \leq |M_{сопп}|, \quad \dot{\varphi}_{дв} = 0 \quad (3.15)$$

Вихідним параметром моделі вертикального каналу (рис. 3.18) є кутова швидкість повороту $-\dot{\varphi}_{бо}$, яка є горизонтальною складовою відносної швидкості модуля. При цьому, в ній враховується ще жорсткість пружного балансувального вузла, що врівноважує блок вертикального наведення у межах допустимих значень.

Вхідними величинами моделей є кут повороту двигуна з урахуванням дії люфту приводу і кут повороту пружини А. При цьому, необхідно враховувати дію моменту неврівноваженості. Вихідною величиною моделі є кутова швидкість вертикального каналу наведення.

Абсолютна кутова швидкість модуля $\dot{\varphi}_{ABC}$ визначається шляхом складання кутової швидкості вертикального каналу наведення $\dot{\varphi}_{бо}$ (відносної швидкості) та кутової швидкості корпусу модуля $\dot{\varphi}_{корп}$:

$$\dot{\varphi}_{ABC} = \dot{\varphi}_{бо} + \dot{\varphi}_{корп}. \quad (3.16)$$

Отриманий сигнал абсолютної швидкості $\dot{\varphi}_{ABC}$ є вхідний сигнал для гіротахметра, що входить до складу системи стабілізації вертикального каналу.

Математична модель гіротахметра ГТ46 описується наступною передатною функцією [16]:

$$W(p) = \frac{U(p)}{\omega_{и}(p)} = \frac{k_{гг}}{T_0^2 p^2 + 2\zeta T_0 p + 1}, \dots \dots \dots (3.17)$$

де, $U(p)$ – вихідна напруга; $\omega_{и}(p)$ – вимірювана кутова швидкість; $k_{гг}$ – статичний коефіцієнт передачі (11,04 Вс/рад); ζ – відносний коефіцієнт демпфірування (0,5 – 0,75); T_0 – постійна часу (0,006736 с).

Математична модель динаміки горизонтального каналу описується аналогічним співвідношенням за винятком схемно-технічних особливостей

горизонтального каналу: відсутність в контурі керування сигналу зворотного сигналу по напрузі та відсутністю в горизонтальному каналі пружного балансувального вузла, що використовується для врівноваженості блоку озброєння [9,10].

$$J_B \ddot{\varphi}_B + M_{TP} \text{sign} \dot{\varphi}_B - M_{HP} \text{sign} \varphi_B + C_p \varphi_B = C_p \varphi_{ДВ} / n_p - M_{HP} \dots\dots\dots (3.18)$$

де, M_{TP} – момент тертя; M_{HP} – момент невірноваженості; J_B – момент інерції, башти; φ_B – кут повороту блоку горизонтального наведення.

Вхідними величинами моделі є кут повороту двигуна – φ_B . При цьому необхідно враховувати дію моменту невірноваженості – M_{HP} . Вихідною величиною моделі є кутова швидкість блоку вертикального наведення – $\dot{\varphi}_{BO}$, яка є горизонтальною складовою відносної швидкості модуля.

В таблицях 3.1-3.3 наведені чисельні значення параметрів, що використовувались при розрахунках.

Таблиця 3.1

Чисельні значення параметрів блоку вертикального наведення

Параметри блоку вертикального наведення		
M_{TP}	Момент тертя, Нм	≤ 200
M_{HP}	Момент невірноваженості, Нм	≤ 33
J_{BO}	Момент інерції, Нмс ²	270
$K_{ПР}$	Жорсткість пружини, Нм/кут.град.	5,1

Таблиця 3.2

Чисельні значення параметрі корпусу горизонтального наведення

Параметри корпусу горизонтального наведення		
$M_{ТРБ}$	Момент тертя, Нм	≤ 400
$M_{НРБ}$	Момент невірноваженості, Нм	≤ 250
J_B	Момент інерції, Нмс ²	887

Таблиця 3.3

Чисельні значення параметрів двигунів

Параметри двигуна		ГН (ЕДМ20)	ВН (ЕДМ14)
$C_{ерс}$	Постійна е.р.с., Вс/рад	0,053	0,056
$R_{ОБ}$	Опір обмотки, Ом	0,1 + 0,05	0,46
$T_я$	Постійна часу якоря, с	0,0015	0,0015
$J_{ДВ}$	Момент інерції ротора двигуна, Нмс ²	0,0003	0,47e ⁻⁴
$M_{ОПОР}$	Момент опору, Нм	(0,075-0,09)	(0,075-0,09)
C_M	Постійна моменту навантаження на валу,	0,053	0,056
C_p	Жорсткість редуктора, Нм/рад	25 · 104	25 · 104
n_p	Передавальне число редуктора	520	490

На підставі аналізу моделей побудови аналогових стабілізаторів та на підставі матеріалів, що викладені вище, були отримані обчислювальні схеми математичних моделей блоку вертикального наведення і блоку горизонтального наведення, що відображають взаємозв'язок моделей всіх вхідних пристроїв для аналогового і цифрового варіантів (рис. 3.18-3.21).

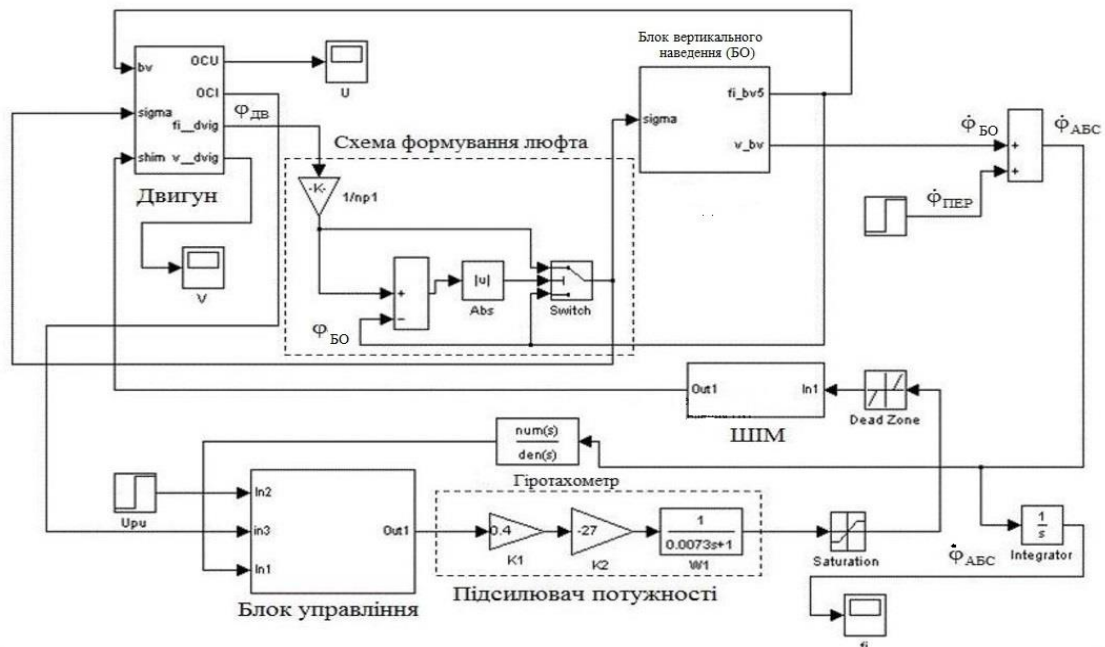


Рис. 3.18. Обчислювальна схема моделі блоку вертикального наведення та двигуна з системою формування люфту - аналоговий варіант

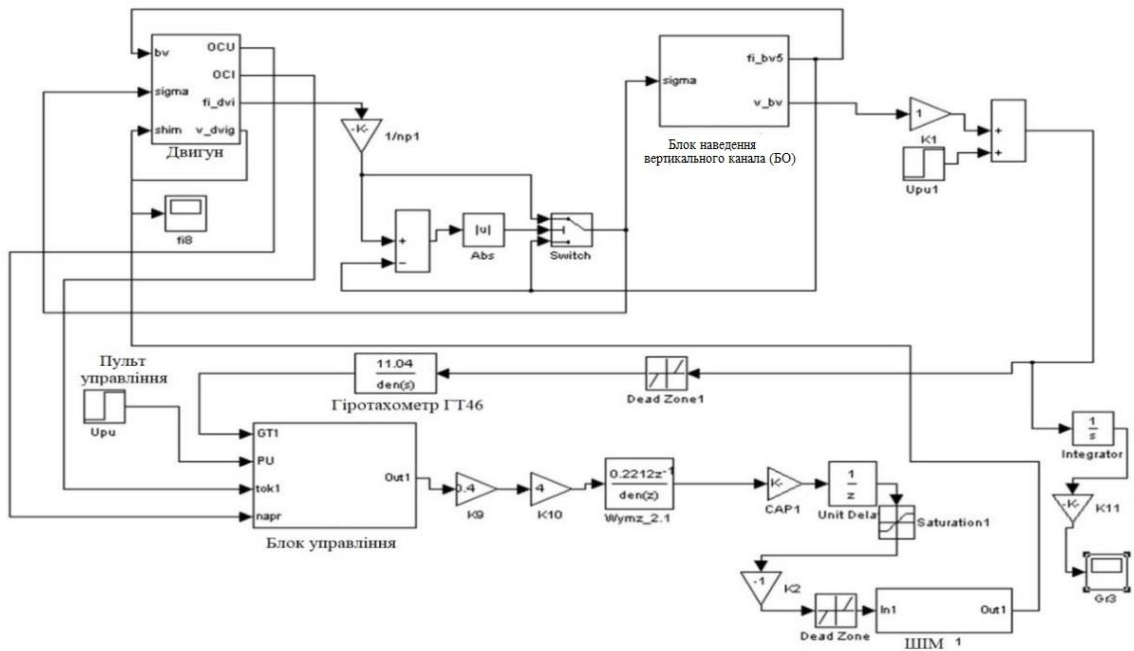


Рис. 3.19. Обчислювальна схема моделі блоку вертикального наведення та двигуна з системою формування люфту - цифровий варіант

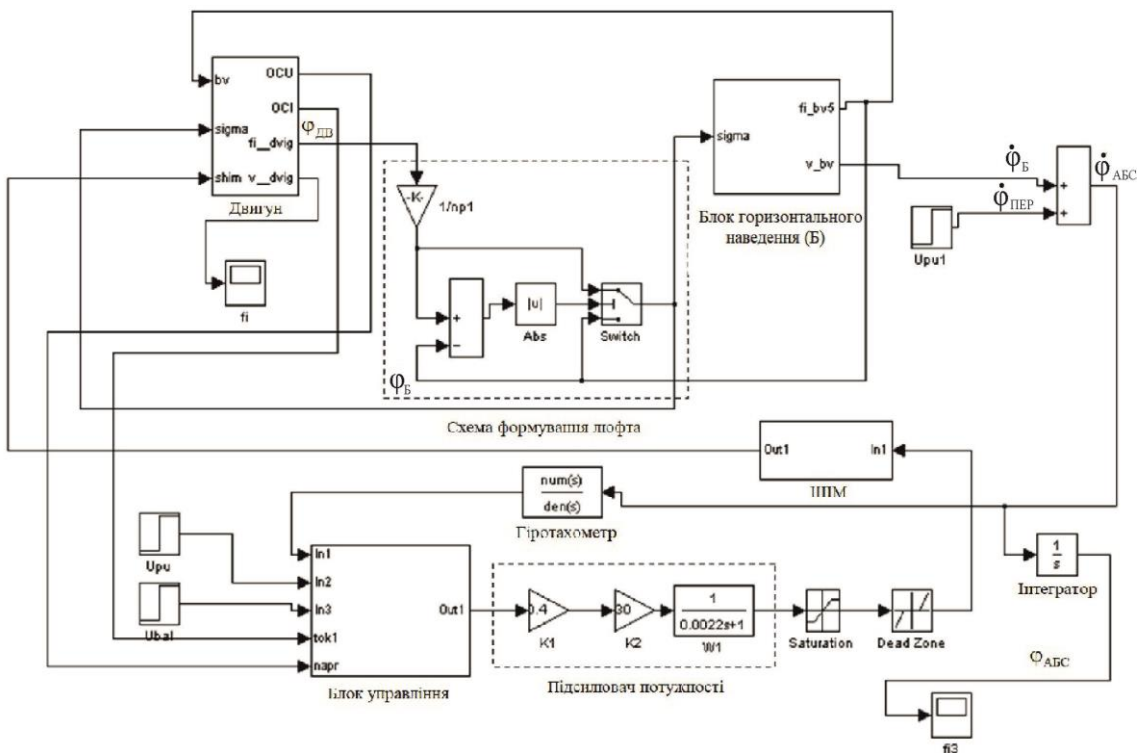


Рис. 3.20. Обчислювальна схема моделі блоку горизонтального наведення та двигуна з системою формування люфту - аналоговий варіант

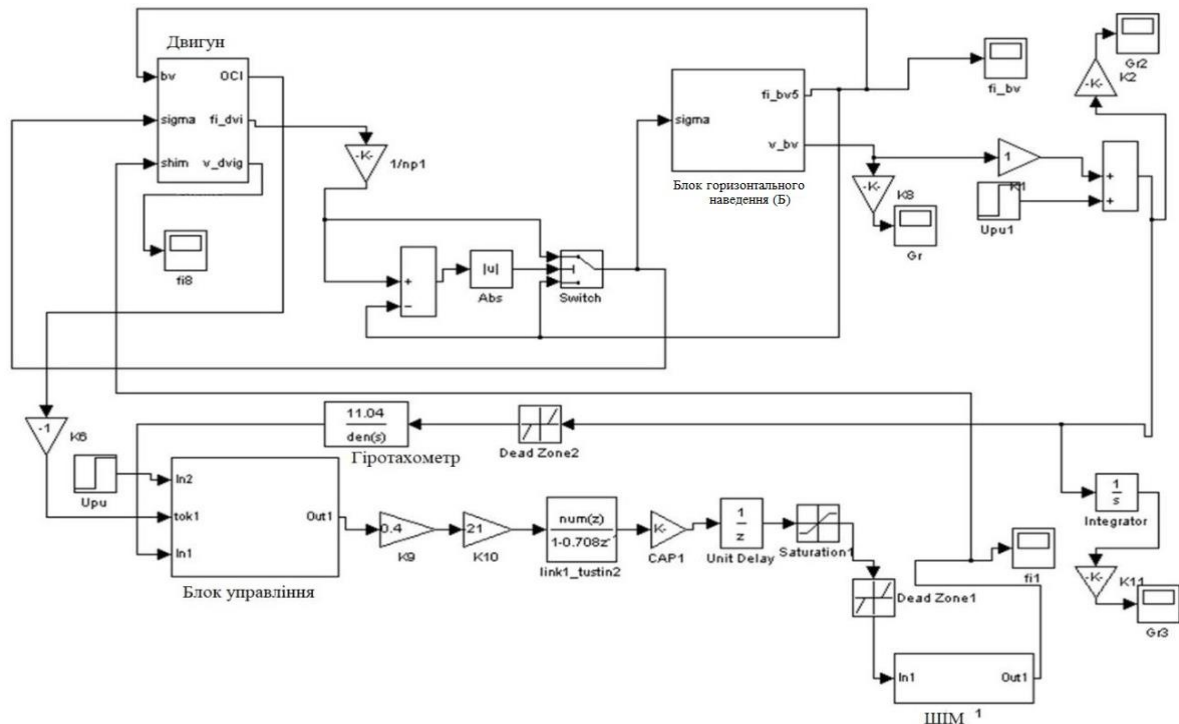


Рис. 3.21. Обчислювальна схема моделі блоку горизонтального наведення та двигуна з системою формування люфту - цифровий варіант

3.3. Аналогові та цифрові математичні моделі горизонтального і вертикального каналів

Розроблені математичні моделі каналів горизонтального та вертикального наведення для аналогового варіанту виконання мають багато спільного у схемній побудові та в той же час мають окремі ланки, які притаманні тільки одному з цих каналів [11].

Спільними ланками їх побудови є те, що тракти управління мають по чотири основних складових, які надходять на суматори:

- перша складова формується на підставі суми сигналів гіротахометра та сигналу з пульта керування, які надходять на інтегратор;
- друга та третя складові формуються на підставі сумарного сигналу гіротахометра та сигналу зворотного зв'язку по струму для каналу ГН, а для каналу ВН до третьої складової ще додається сигнал зворотного зв'язку по напрузі;

- четверта складова по каналу ГН визначається сигналом зворотного зв'язку по струму, а в каналі ВН визначається сигналами зворотних зв'язків по струму та напрузі;

Для забезпечення можливості підвищення якості процесів управління передбачено:

– налаштувальні коефіцієнти K_y (підсилення тракту управління), ГТ (підсилення тракту по сигналу гіротахометра), ДС (підсилення тракту по сигналу датчика струму), ТГ (віртуальний коефіцієнт підсилення по каналу тахометра (тільки для каналу ВН));

– проходження на різних етапах сигналів управління по ланцюгам математичних моделей в каналах передбачені фільтри низьких або високих частот, а також пристрої, що обмежують рівні сигналів.

Переходи від аналогової до цифрової форми обчислення виконуються за допомогою Z-перетворення (дискретність перетворення 2,5 мс) відповідних передаточних функцій програмними методами. При цьому, використовувався пакет Control Tool Box системи MATLAB, а саме: функція `c2d` з такими методами дискретизації, як затримка нульового порядку на вході (`zoh`), і білінійна апроксимація (`tustin`). Методи дискретизації обиралися, виходячи з умови забезпечення збігу логарифмічних амплітудно-частотних характеристик передавальних функцій. Ці функції побудовані за електричними схемами відповідних ланок блоку управління в системі WorkBench, передавальних функцій цих же ланок, які отримані як аналітичними методами і побудованими в системі MATLAB, так і експериментальним шляхом.

Обчислювальні схеми горизонтального каналу наведені на рис. 3.22 - аналогового, на рис. 3.23 – цифрового, відповідно.

Обчислювальні схеми горизонтального каналу наведені: аналогового - на рис. 3.24, цифрового – на 3.25, відповідно.

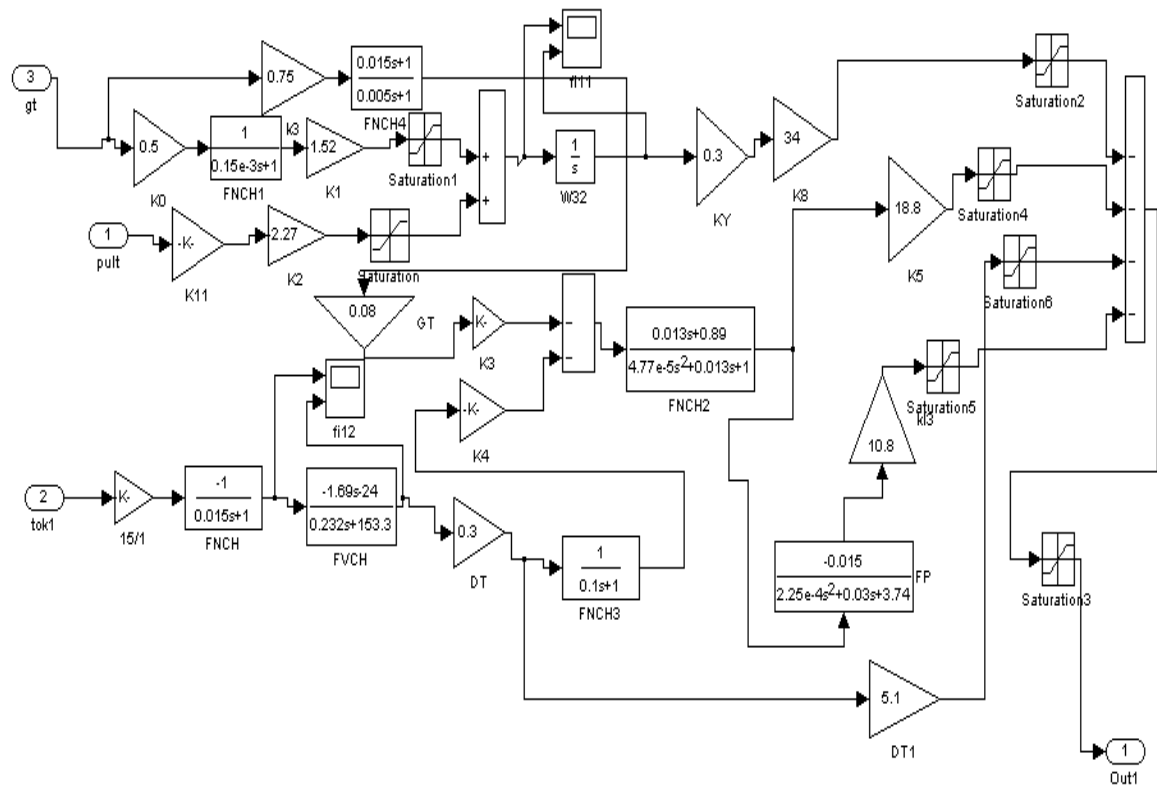


Рис. 3.22. Обчислювальна схема аналогового каналу ГН блока управління стабілізатором

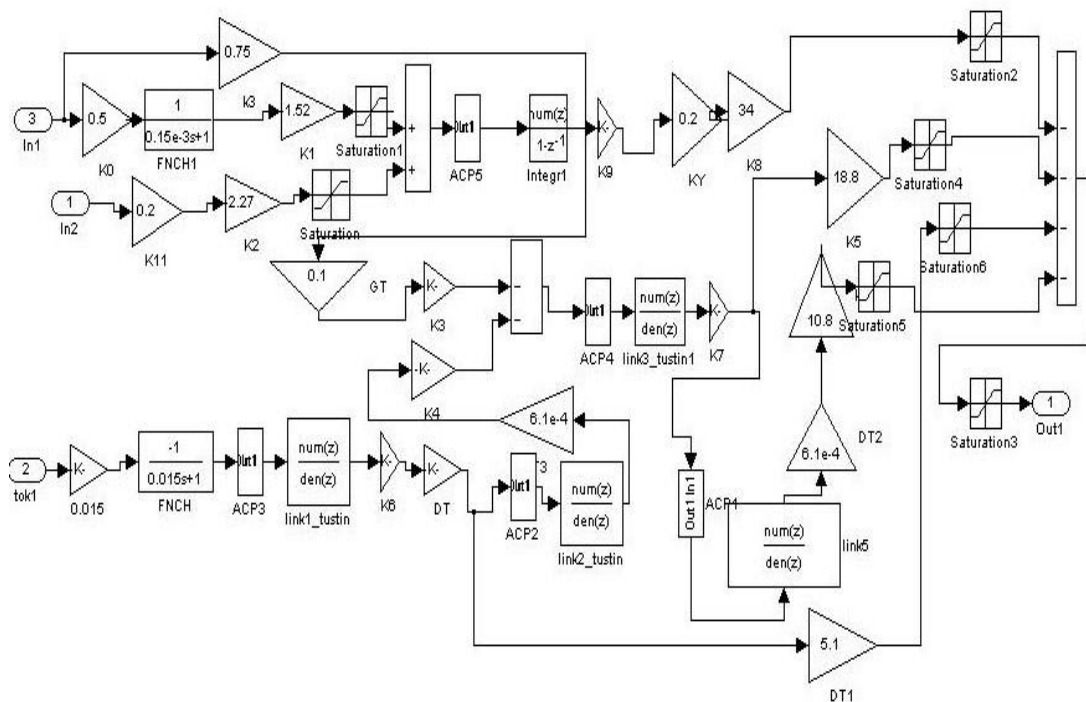


Рис. 3.23. Обчислювальна схема цифрового каналу ГН блока управління стабілізатором

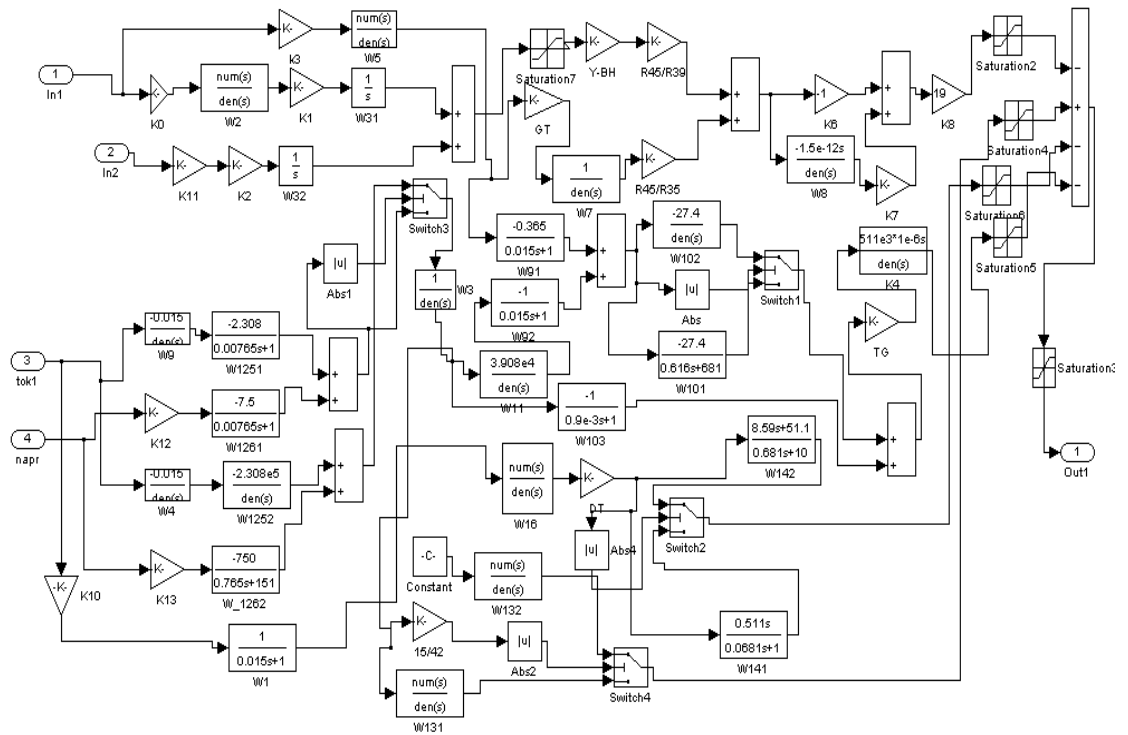


Рис. 3.24. Обчислювальна схема аналогового каналу ВН блока управління стабілізатором

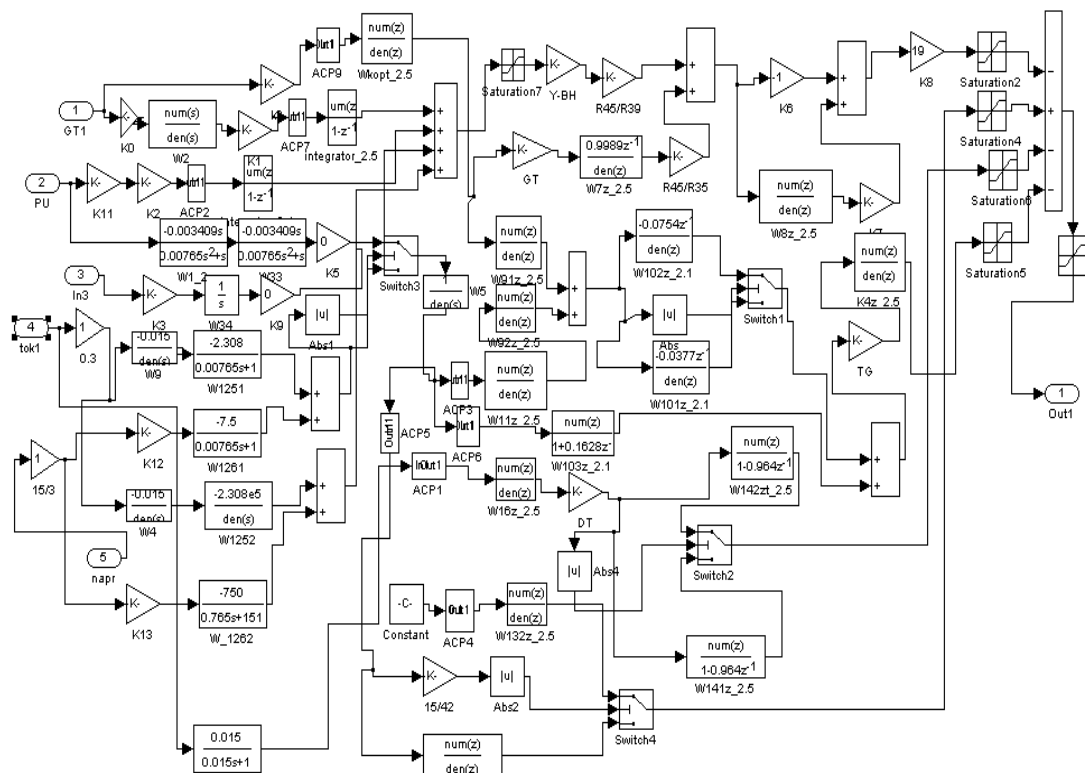


Рис. 3.25. Обчислювальна схема цифрового каналу ВН блока управління стабілізатором

3.4. Використання математичних моделей стабілізатора при моделюванні режимів управління

Розроблені моделі математичного моделювання були використані при моделюванні режимів управління стабілізатора в режимах:

- «АВТ» – наведення горизонтального та вертикального каналів з швидкостями ≤ 6 °/с та «ПАВ» – наведення горизонтального та вертикального каналів з швидкостями ≥ 35 °/с;
- «ПЕРЕКИД» – перемикання з швидкості наведення ≤ 6 °/с на швидкість наведення ≥ 35 °/с;
- «ЦВ» – перекид блоку горизонтального каналу наведення в визначеному напрямку на обраний об'єкт з швидкістю ≥ 35 °/с;
- «УПР» – режим функціонування стабілізатора з підвищеною точністю з швидкістю наведення $\leq 0,02$ °/с;
- «ВУ», «НУ» – функціонування стабілізатора на верхньому та нижньому обмежувачах руху;
- «ВНИЗ» та «ВВЕРХ» – обминання заборонених для виконання повороту зон;
- «ГАБАРИТ» – приведення каналів горизонтального (Б) та вертикального наведення (БО) у габарити виробу;

Правильність моделювання режимів управління була підтверджена на перших зразках стабілізатора, які були виготовлені відповідно до конструкторської документації та пройшли всі види випробувань.

3.5. Підвищення точнісних параметрів стабілізатора в режимі «УПР»

Метою підвищення точнісних параметрів стабілізатора є усунення впливу відводів Б та БО на час функціонування стабілізатора в режимі «УПР».

Для виконання поставленого завдання запропоновано на цей час управління приладовим комплексом стабілізації проводити в режимі «УПР-1» по тракту, в якому не має сигналу відведення, що виникає в результаті не повністю скомпенсованого залишкового нульового сигналу гіротахометра (ДКШ) [12].

Роботи щодо доцільності та обґрунтування введення режиму «УПР-1» проведено за допомогою математичного моделювання та експериментального відпрацювання отриманих результатів на атестованому технологічному стенді СТМ02 та навчальному комплексі УК675.

3.5.1. Похідні данні для проведення математичного моделювання по введенню режиму «УПР-1»

Для виконання досліджень по введенню режиму «УПР-1» використовувалась математична модель, що описує та моделює роботу цифрового приладового комплексу вимірювання механічних величин та стабілізації по горизонтальному каналу в режимі «УПР».

Загальна схема математичної моделі наведена на рис. 3.26. У ній позначені наступні елементи:

Subsystem1 – блок, що описує кінематику руху Б відносно інерціального простору;

Gyrofachometer – блок, що описує математичну модель гіротахометра;

BU – блок, що описує алгоритми роботи блоку керування;

Dvigatel+Bashnya – блок, що описує математичну модель двигуна механізму повороту, самого механізму повороту та башти.

Zveno 3, zveno 7, zveno 17 – є аналогово-цифровими перетворювачами.

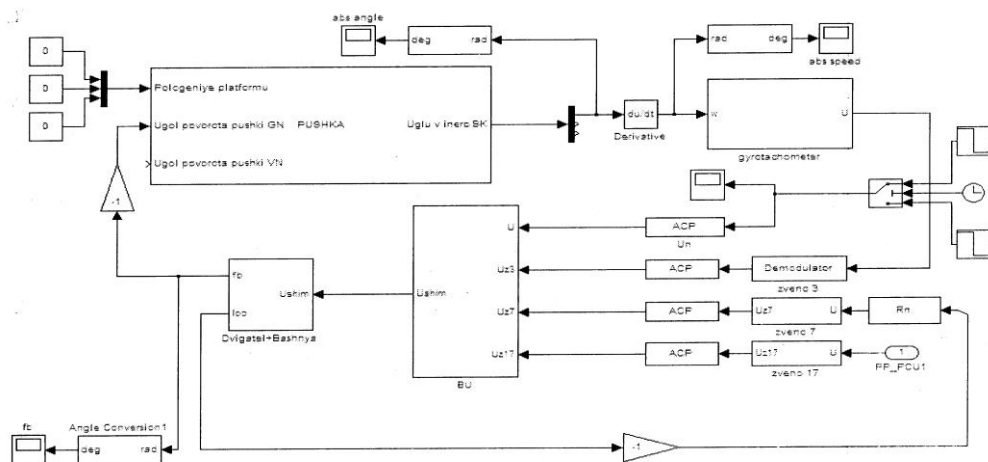


Рис. 3.26. Математична модель горизонтального каналу в режимі «УПР»

Кінематика руху Б в інерціальному просторі реалізується в блоці Subsystem1.

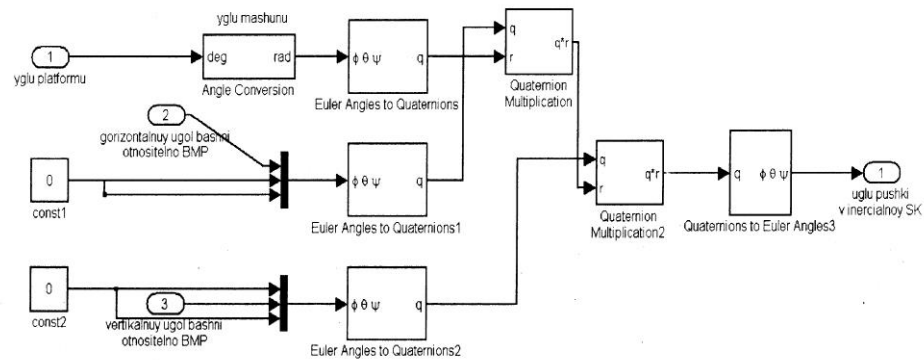


Рис.3.27. Блок Subsystem1. Модель кінематики руху Б

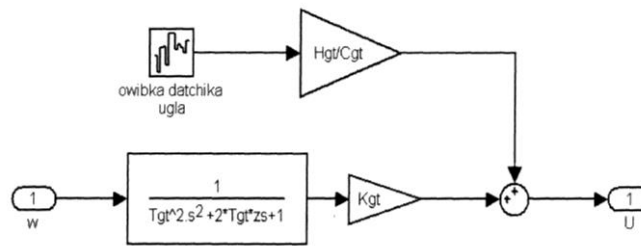
Алгоритми цього блоку є переходами від системи координат корпусу в інерціальному просторі до системи координат Б в інерціальному просторі [13]. На вході цього блоку подаються три кути положення корпусу відносно інерціального простору, відносні кути Б та механізму повороту відносно корпусу. Обчислення трьох кутів положення Б реалізується за допомогою кватерніонів [14,15]. Відомо що кватерніони в порівнянні з кутами Ейлера мають істотні переваги, а саме: немає невизначеності при кутах $\pm 90^\circ$. На виході цього блоку отримуються кути положення башти в інерціальному просторі. Ці кути потім диференціюються та подаються на вхід блоку гіротахометра.

Гіртахометр ГТ-46

Параметри передатної функції гіртахометра ГТ-46 (ДКШ), прийняті відповідно [11]:

$$W(p) = \frac{U(p)}{\omega_n(p)} = \frac{k_{гг}}{T_0^2 p^2 + 2\zeta T_0 p + 1},$$

де, $U(p)$ – вихідна напруга; $\omega_n(p)$ – вимірювана кутова швидкість; $k_{гг}$ – статичний коефіцієнт передачі (11,04 Вс/рад); ζ – відносний коефіцієнт демпфірування (0,5 – 0,75); T_0 – постійна часу (0,006736 с).

Рис. 3.28. Блок *Gyrofachometer*. Модель гіротахометра

У блоці *owibka dathika ugla* моделюються випадкова помилка датчика кута гіротахометра та переводиться в розмірність вольт, а потім додається до вихідного сигналу гіротахометра. Середня помилка датчика кута обирається так, щоб імітувати поріг чутливості гіротахометра 0,015 град/сек.

Блок управління

У цьому блоці реалізується алгоритм керування. Вхідними сигналами є: сигнали з гіротахометра, датчика струму, сигнал з пульта керування, а також приладів приведення та приладу режиму «ЦВ». Вихідним сигналом є сформований сигнал ШІМ, який через підсилювач подається на електродвигун.

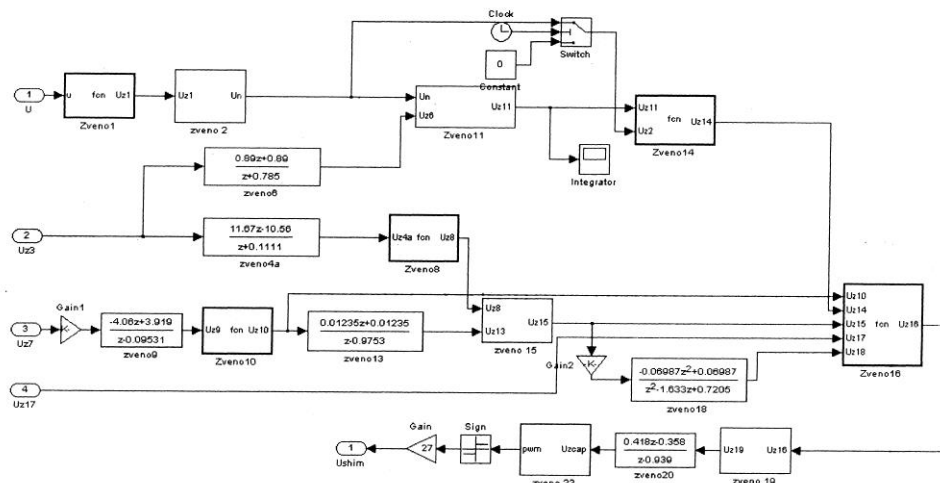


Рис. 3.29. BU. Модель блоку управління

Були підібрані значення наступних коефіцієнтів, що налаштовуються, у блоці керування, при яких стабілізатор має найкращі характеристики

перехідного процесу: $K_{дт} = 0,1$ – коефіцієнт підсилення у ланці №10 блоку керування; $K_{гт} = 0,1$ – коефіцієнт підсилення у ланці № 8 блоку керування; $K_y = 0,34$ – коефіцієнт підсилення у ланці № 14 блоку управління.

Електродвигун

Модель двигуна розроблено у вигляді двох блоків – блоку перетворювачів, які містять співвідношення для формування струму якоря двигуна з урахуванням постійної часу якоря, і блоку механічної частини двигуна та відповідають формулам 3.12-3.15.

В таблиці 3.4, 3.5 відповідно, наведено чисельні значення параметрів двигуна ЕДМ02 та редуктора, що використовувались при розрахунках.

Таблиця 3.4

Чисельні значення параметрів двигуна ЕДМ02

Параметри двигуна		ГН (ЕДМ02)
C_E	Постійна ЕРС, Вс/рад	0,0625
$R_{об}$	Опір обмотки, Ом	0,08
T_y	Електромагнітна постійна двигуна, с	0,0015
$J_{дв}$	Момент інерції двигуна, Нмс ²	$5 \cdot 10^{-3}$
$M_{сопр}$	Момент опору	0,0075-0,09
C_M	Постійна моменту навантаження на валу, Нм/А	0,0625
T_M	Електромеханічна постійна	$10 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 3.5

Чисельні значення параметрів редуктора

Параметри редуктора		
C_p	Жорсткість редуктора, Нм/рад	$25 \cdot 10^{-4}$
n_p	Передавальне число редуктора	467,617
$\chi_{л}$	Сумарний люфт, кут.хв	23,6

У системі Simulink:

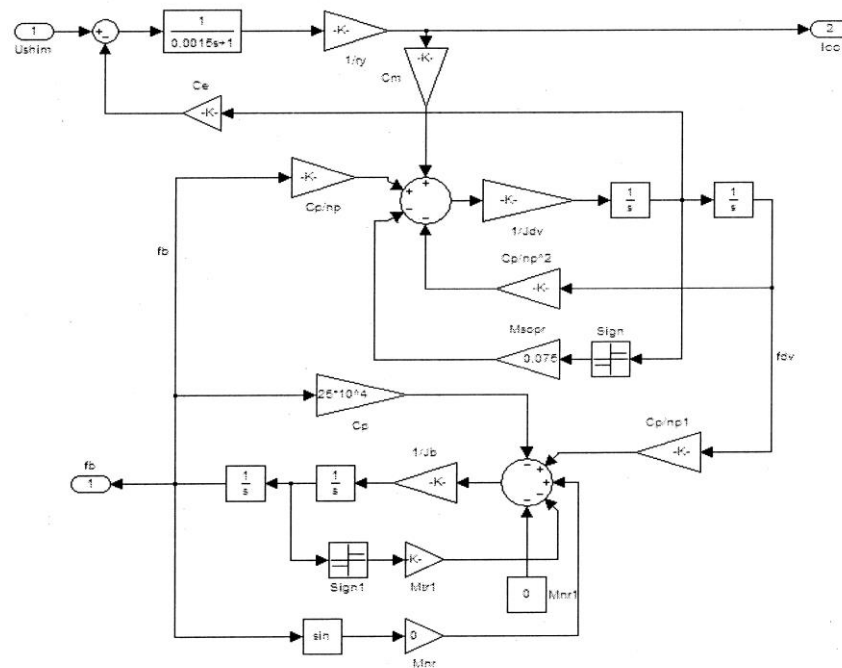


Рис.3.30. Блок Dvigatel+Bashnya. Модель двигуна та блоку горизонтального наведення

У процесі моделювання розглядався варіант з введенням у режим «УПР» підрежиму «УПР-1». Підрежим «УПР-1» вводився з метою виключення, з режиму наведення на малих швидкостях можливих змін нульового сигналу гіротахметра, що впливає на роботу приладового комплексу вимірювання механічних величин та стабілізації.

Алгоритм формування режиму «УПР-1» наведено на рис. 3.31.

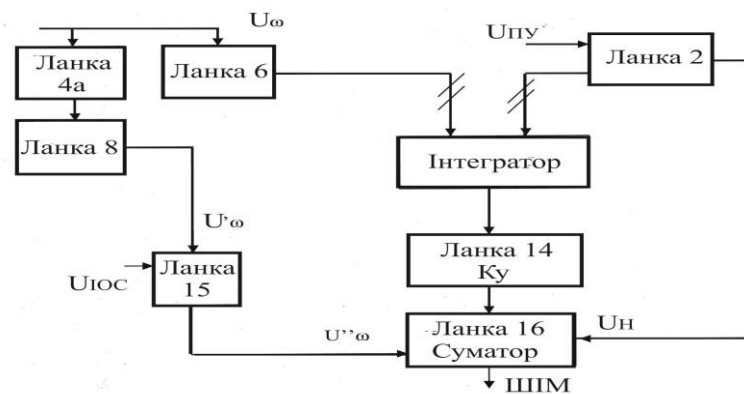


Рис. 3.31. Алгоритм формування режиму «УПР-1»

де, $U''_{\omega}, U'_{\omega}$ – сигнали, що сформовані по вихідному сигналу ГТ; U''_{ω} – сигнал, що демпфує, який сформований по вихідному сигналу ГТ і сигналу зворотного зв'язку по струму, $U_{юс}$; K_y – коефіцієнт підсилення по тракту управління; $U_{пу}$ – вихідний сигнал пульта керування (ПУ); U_H – сигнал наведення, сформований по вихідному сигналу ПУ.

Перехід у режим «УПР-1» забезпечується по команді «УПР-1» з пульта управління ПУ, через 1–2 с після початку роботи виробу.

3.5.2. Результати моделювання

У процесі моделювання здійснювалося порівняння характеру зміни кутового положення й абсолютної швидкості БО у «УПР» та «УПР-1». Для цього протягом 1,5 с, з ПУ посилався сигнал рівнем 10 В. Потім сигнал ПУ обнулювався (рис. 3.32 а). На другій секунді від початку діапазону здійснювався перехід у режим «УПР-1», тобто обнулювався сигнал ПУ та сигнал ДКШ на вхід інтегратора і запам'ятовувався вихідний сигнал інтегратора та сигнал ПУ передавався на вхід суматора. Тому що на цей час сигнал ПУ дорівнював нулю, зміни кутового положення БО не було.

На третій секунді від початку діапазону збільшувався рівень сигналу ПУ до 10 В (рис. 3.32 а), кут та швидкість БО змінювались, а сигнал інтегратора не змінювався (рис. 3.32 г). При цьому, швидкість наведення обмежувалась параметрами вихідного сигналу ДКШ по ланцюгу, що демпфірує (рис 3.32 в).

Моделювання проводилось для варіанта режиму «УПР-1», коли перехід у режим здійснюється відновленням вхідних сигналів інтегратора та передачею сигналу наведення з ПУ безпосередньо на суматор. При цьому, вихідний сигнал інтегратора відповідає моменту переходу в режим «УПР-1» (рис. 3.32 г).

Для порівняння з режимом стабілізації керування в режимі «УПР-1» забезпечується при нульовому сигналі ПУ протягом 1,5 с, а потім зміна кута забезпечується пультом у режимі наведення.

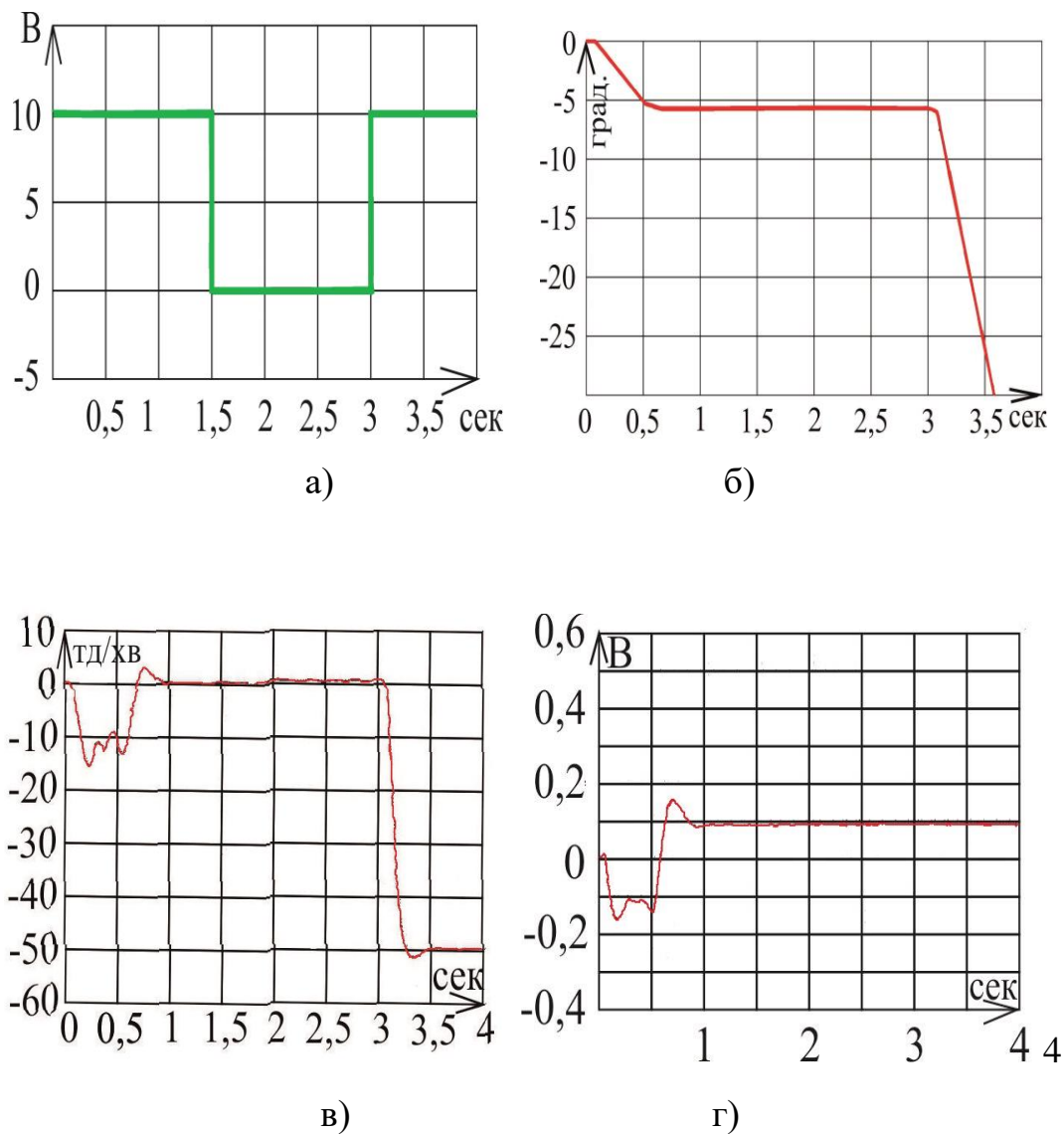


Рис. 3.32 а) – вхідний сигнал с ПУ; б) – абсолютний кут φ_{ABC} ;

в) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; г) – сигнал з виходу інтегратора при

$M_{np} = 0$ Нм та вхідному сигналі (рис. 3.32 а)

Як видно з рис. 3.32, при відсутності моменту невірноваженості в режимі «УПР-1», стабілізація по швидкості забезпечує збереження кутового положення башти.

Для оцінки погрішності стабілізації в режимі «УПР-1» під впливом моменту невірноваженості тривалість режиму «УПР» збільшили до 3 с (рис. 3.33 а).

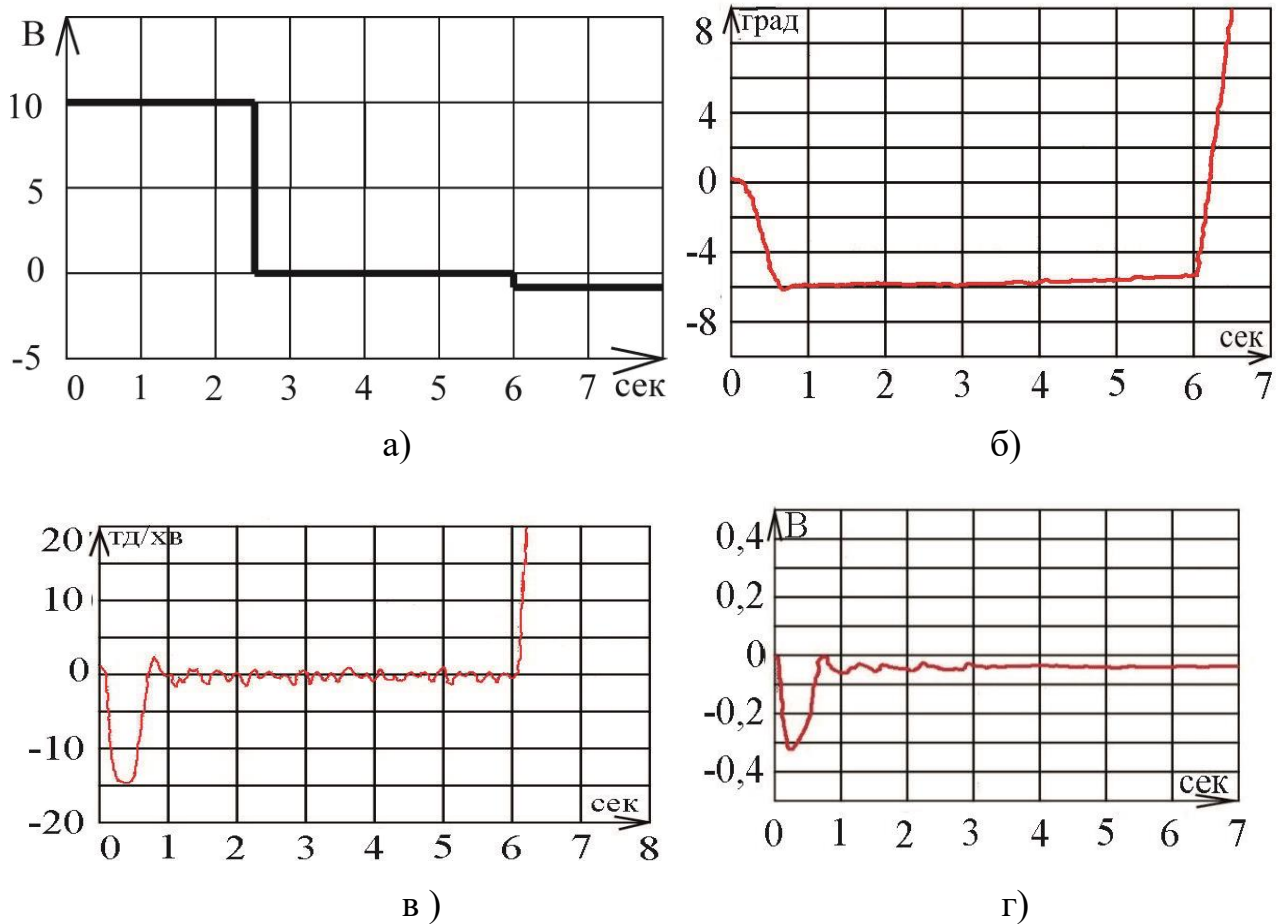
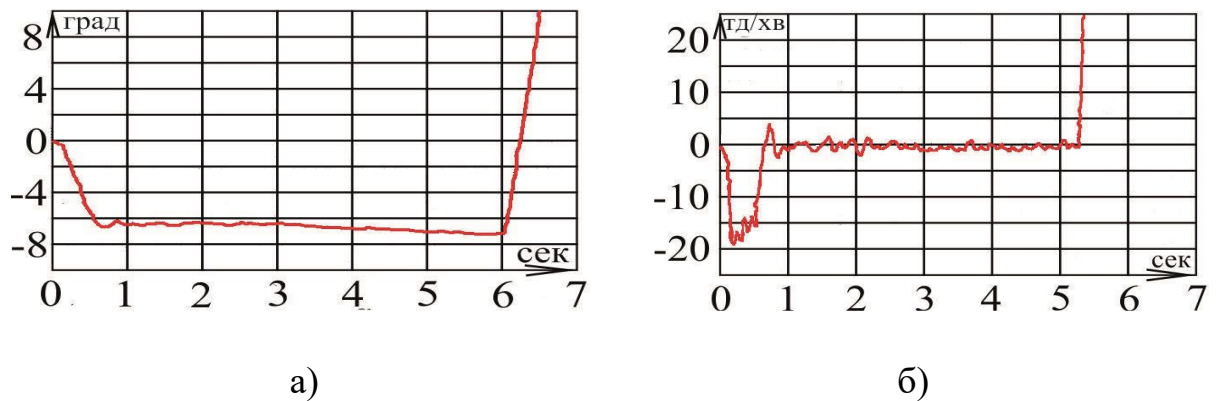


Рис. 3.33. а) – вхідний сигнал з ПУ; б) – абсолютний кут φ_{ABC} ; в) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; г) – сигнал з виходу інтегратора при $M_{HP} = 650$ Нм

Для випадку $M_{HP} = 650$ Нм (рис. 3.33) стабілізація кутового положення башти також забезпечується, однак при цьому є невеликі відведення (приблизно 0,5 хвилини за 1,5 с) на рівні 5 т.д./хв у режимі АВТ < 25 т.д./хв).



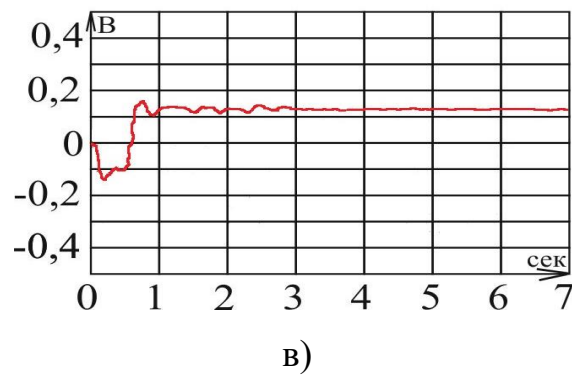
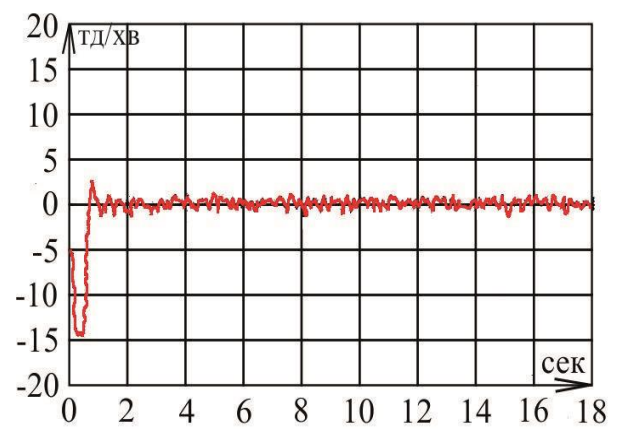
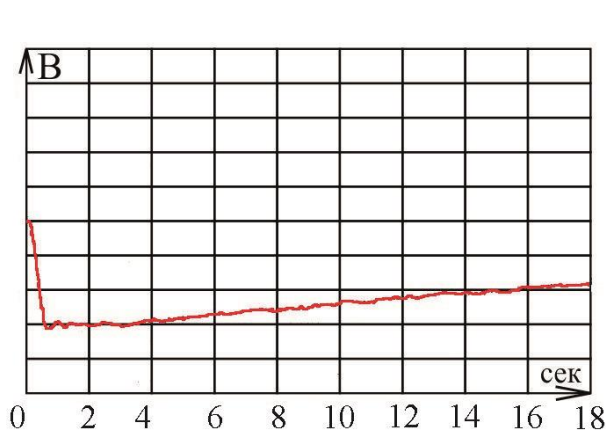


Рис. 3.34. а) – абсолютний кут φ_{ABC} ; б) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; в) – сигнал з виходу інтегратора $M_{нр} = -650$ Нм і вхідному сигналі (рис. 3.34).

При зміні знака моменту невірноваженості (рис. 3.34) напрямок відведення також змінився, але рівень швидкості відведення не перевищує 5 т.д/хв.

При зміні сигналу наведення у відповідності з циклограмою рис. 3.33 з урахуванням стабілізації Б на куті 6° та наступному переході в режим «УПР-1» вихідний сигнал інтегратора не змінюється (рис. 3.33, рис. 3.34), при цьому відбувається незначне відхилення башти ($\approx 1,5$ кут.хв.) від вихідного положення у бік збільшення або зменшення залежно від знака моменту невірноваженості (рис. 3.33, рис. 3.34).

Зі збільшенням тривалості режиму «УПР-1» до 15с. (час тривалості режиму «УПР») відхилення башти від вихідного положення не перевищує 2 хв. (рис.3.35).



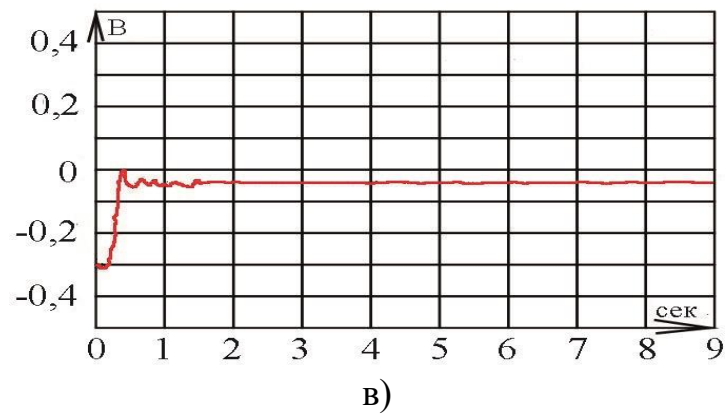


Рис. 3.35. а) – абсолютний кут ϕ_{ABC} ; б) – абсолютна швидкість $\dot{\phi}_{ABC}$; в) – сигнал з виходу інтегратора $M_{nr} = 650$ Нм

Для імітації режиму наведення блоку БО з малими швидкостями зміну сигналу задавали відповідно до рис.3.36 а.

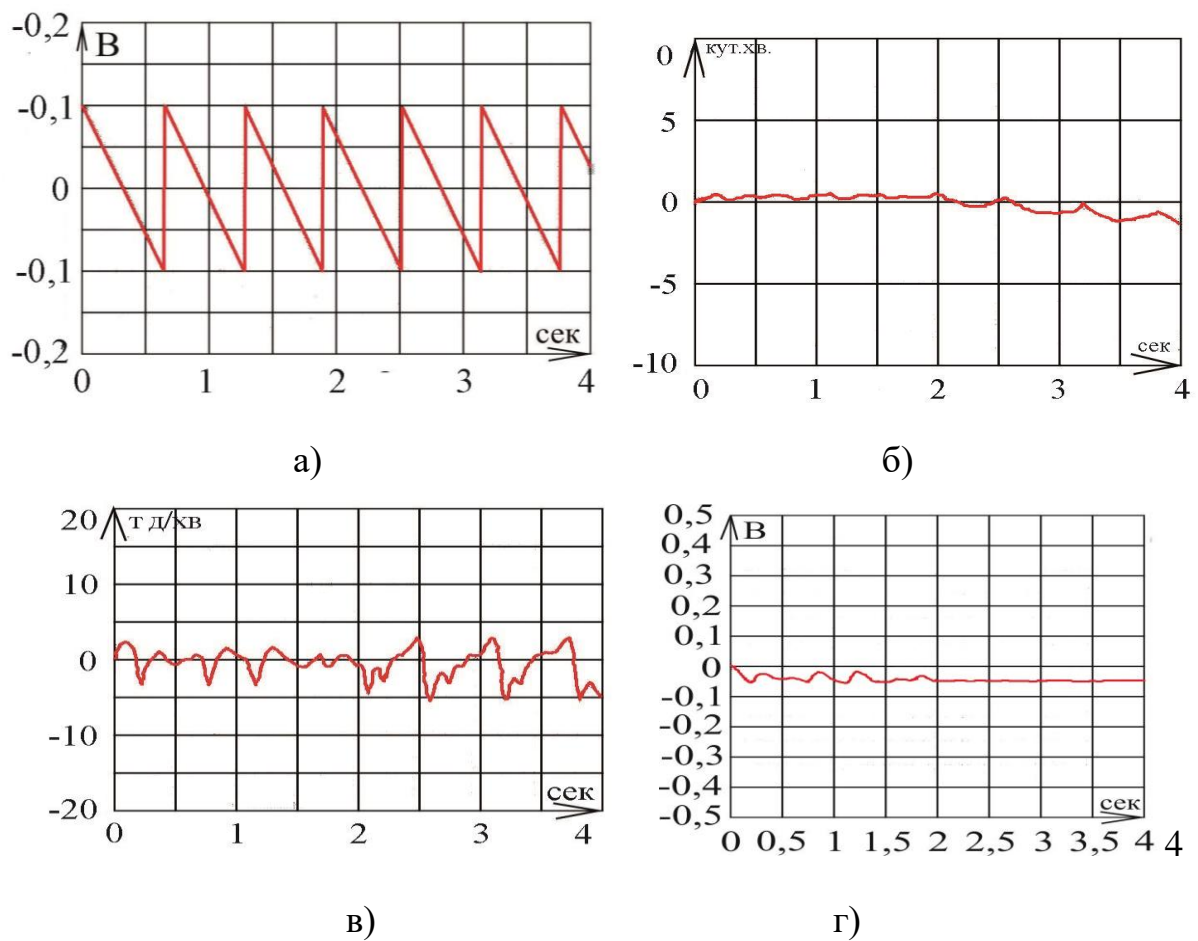


Рис. 3.36. а) – вхідний сигнал з ПУ; б) – абсолютний кут ϕ_{ABC} ; в) – абсолютна швидкість $\dot{\phi}_{ABC}$; г) – сигнал з виходу інтегратора $M_{nr} = 650$ Нм та вхідному сигналі (рис.3.34 а)

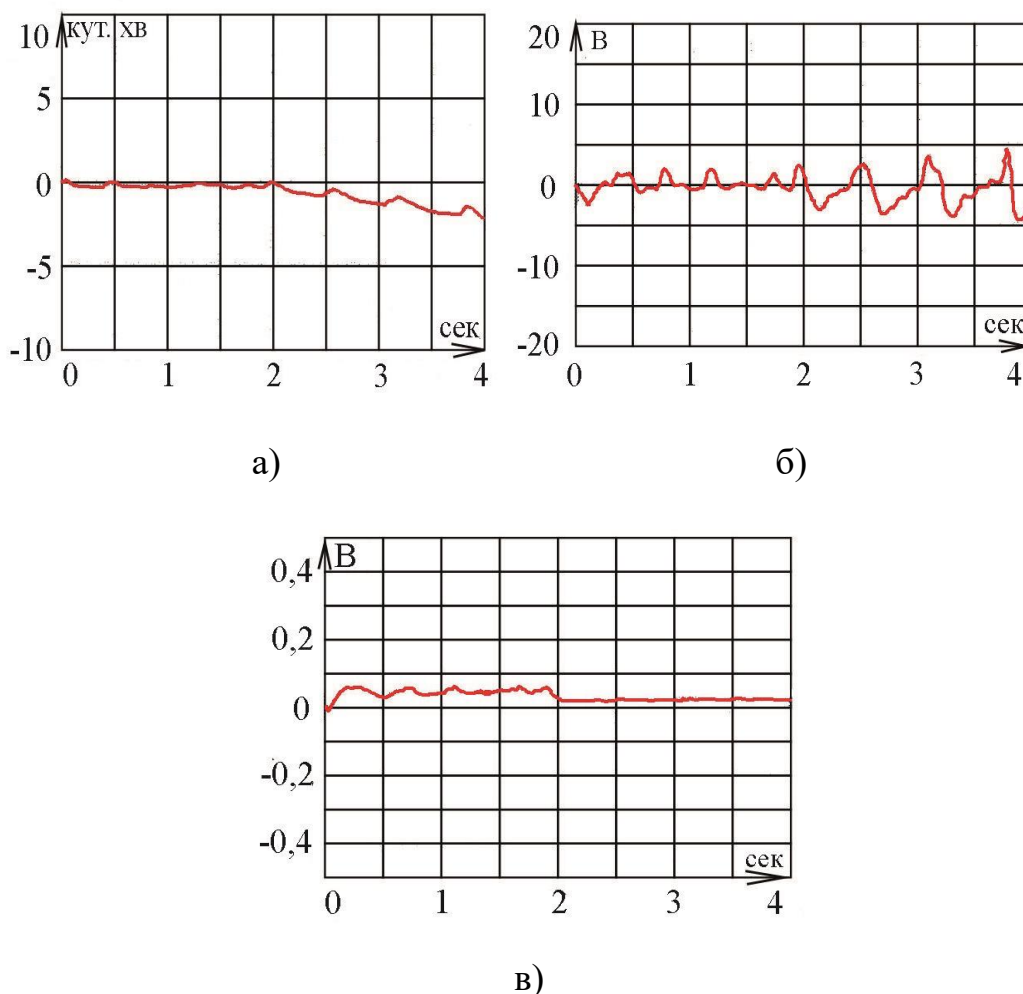


Рис. 3.37. а) – абсолютний кут φ_{ABC} ; б) – абсолютна швидкість $\dot{\varphi}_{ABC}$; в) – сигнал з виходу інтегратора $M_{нр} = -650 \text{ Нм}$ та вхідному сигналі (рис. 3.36)

На рис. 3.36 та 3.37 надано результати режиму наведення в «УПР-1» при рівні моменту невірноваженості $M_{нр} = \pm 650 \text{ Нм}$. По зміні положення БО видно, що в режимі «УПР» з використанням підрежиму «УПР-1» можна забезпечити рівномірне наведення й компенсувати кут її відхилення на інтервалі часу.

За результатами моделювання отримані наступні результати:

1. При моменті невірноваженості, що не перевищує сумарний момент опору, режим стабілізації забезпечується незалежно від використання в режимі «УПР» підрежиму «УПР-1»;

2. При моменті невірноваженості, що перевищує сумарний момент опору, та наявності підрежиму «УПР-1» відхилення башти від вихідного положення (на

момент переходу в режим «УПР-1») на інтервалі до 15 секунд не перевищує 2 кут.хв. Швидкість відхилення не перевищує поріг чутливості гіротахометра;

3. При наявності підрежиму «УПР-1» забезпечується в режимі «УПР» рівномірне наведення БО на мінімальних швидкостях у варіанті запам'ятовування вихідного сигналу інтегратора на момент переходу в режим «УПР».

3.5.3. Результати експериментального відпрацювання приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації в режимі «УПР» при наявності підрежиму «УПР-1»

Для підтвердження правильності висновків, що отримані за результатами математичного моделювання, проведено експериментальне відпрацювання на одному з комплектів приладової системи стабілізації, на якому було відкореговано програмно-алгоритмічне забезпечення по введенню додаткового підрежиму «УПР-1».

Випробування проводилися тільки по каналу ВН, як найбільш підданому впливу моменту невірноваженості блоку наведення вертикального каналу. Необхідність випробувань по каналу ГН визначалась за результатами перевірок каналу ВН.

На стенді СТМ02 були перевірені параметри й функціонування приводів ВН і ГН стабілізатора на відповідність технічним вимогам на стабілізатор після доробки привода ВН по введенню режимів «УПР-1». Крім цього, виконано перевірку параметрів привода ВН на стенді СТМ02 у режимах «УПР-1» при імітації моменту невірноваженості (M_{HP}), що перевищує 2 кгм момент опору (M_c) привода.

За результати випробувань отримано наступні данні:

1. При перевірках підтверджено, що параметри й функціонування приводів ВН і ГН на стенді СТМ02 після доробки ПАО привода ВН по введенню режиму «УПР-1» відповідають вимогам документації (без включення стабілізатора у режими «УПР-1»);

2. При імітації на стенді СТМ02 значення $M_{HP}=32$ кгм, та моменту опору $M_{OP} = 30$ кгм «УПР-1» у режимі заміни інтегратора лінійним підсилювачем і у режимі заміни інтегратора аперіодичною ланкою рух привода під впливом моменту неврівноваженості відбувається зі швидкістю ω , що значно перевищує припустиму швидкість відведення в режимі «АВТ».

Зменшення швидкості ω до припустимого значення $\omega_{від}$ за рахунок збільшення коефіцієнта демпфірування $K_{ГТВН}$ та коефіцієнта підсилення $U_{ВН}$ не забезпечувалось, тому що це призводило до збудження привода ВН.

Оцінка параметрів привода ВН (нерівномірність швидкості наведення, мінімальна швидкість наведення) у режимах УПР-1 при $M_{HP} < M_{OP}$ не проводилася, тому що доцільно дану оцінку зробити в складі УК675;

3. Результати випробувань привода ВН у складі УК675 показали наступне:

3.1. При $M_{HP} < M_{OP}$ ($M_{OP} = 9,0$ кгм, $M_{HP} = 0,75$ кгм):

– при використанні в режимі УПР-1 лінійного тракту замість інтегратора показники привода ВН відповідають вимогам технічних вимог на стабілізатор у режимі УПР:

$$\omega_{min} < 0,02 \text{ } ^\circ/\text{с} \text{ (по технічним вимогам: } < 0,02 \text{ } ^\circ/\text{с}),$$

$$\omega_{нерівномір} \leq 0,5 \text{ т.д. (по технічним вимогам: } < 1,0 \text{ т.д.).}$$

Оцінка точності у режимі слідкування за рухомим об'єктом за допомогою ручок пульта ПУ у даному режимі роботи привода ВН показує наступне:

– при переміщенні указки по сітці з швидкістю 1 т.д./с, що відповідає швидкості руху об'єкта спостереження 6 км/год на відстані 1,5 км, погрішність супроводу об'єкта (слідкування лазерного променя за указкою) досягає 0,5 т.д.. Однак, при варіюванні швидкості руху об'єкта (указки) погрішність відстеження досягає 1 т.д., а при реверсі руху 4 т.д.;

– при використанні аперіодичної ланки, замість інтегратора, показники привода ВН поліпшуються ($\omega_{від} = 0$, $\omega_{min} = 0,0015^\circ/\text{с}$, $\omega_{нерівномір} \leq 0,3$ т.д.).

Недолік у каналі з аперіодичною ланкою – підпливання приводу до 0,5 т.д. при гальмуванні (відсутнє при використанні лінійного тракту), у зв'язку із чим

оцінка погрішності відстеження приводом ВН рухомого об'єкту не проводилось;

3.2. При $M_{НР} > M_{ОПОР}$ ($M_{ОПОР} = 9,0$ кгм, $M_{НР} = 9,37$ кгм):

– даний режим імітується шляхом підвішування додаткової ваги (5,5 кг) до імітатора вертикального каналу на відстані 1,5 м від осі цапф. У момент вмикання режиму «УПР-1» відзначається рух вниз імітатора. Зі збільшенням маси вантажу швидкість руху збільшується. Поворотом ручок пульта ПУ вгору вдається зупинити рух вертикального каналу і навести промінь лазера на контрольну точку.

В умовах даного п. 3.5.3 була проведена оцінка ефективності варіанта реалізації режиму «УПР-1» з обнулінням вхідного сигналу інтегратора та запам'ятовуванням рівня сигналу інтегратора, що передуює моменту переходу в режим «УПР». Результати випробувань показали, що після переходу в режим «УПР-1» забезпечується стабілізація променя лазера на об'єкті, за яким проводиться спостереження протягом ≈ 1 хв, що перевищує тривалість режиму «УПР» (≈ 15 с) та, якщо буде потреба, забезпечується рівномірне наведення променя лазера по мішені.

Результатами випробувань стабілізатора у режимі «УПР» з подрежимом «УПР-1» підтверджено, що:

1. Варіант подрежиму «УПР-1» із запам'ятовуванням вихідного сигналу інтегратора на момент переходу в режим «УПР-1» забезпечує стабілізацію осі щодо вихідного положення й рівномірне наведення в режимі супроводу рухомого об'єкту. При цьому відведення осі стабілізації відсутні;

2).3 метою виключення впливу зміни нульових сигналів гіротахометра, що призводять до відведення осі стабілізації відносного вихідного положення, у процесі функціонування доцільно ввести в режим «УПР» подрежим «УПР-1» у варіанті обнуління вхідних сигналів інтегратора, запам'ятовування вихідного сигналу інтегратора на момент переходу в «УПР-1» та задання сигналу наведення з ПУ безпосередньо на суматор.

Висновки до розділу 3

Для підтвердження правильності прийнятих схемо-технічних рішень при створенні стабілізатора, корегуванні його режимів роботи до впровадження у матеріальну частину були виконані наступні етапи робіт:

1. Розроблено математичні моделі окремих приладів, вузлів та блоків, що входять до складу стабілізатора;
2. Розроблено математичні моделі у вигляді математичних моделей блоку БО (канал ВН) та математичної моделі Б (канал ГН) для безперервного та дискретного варіантів обчислення;
3. Розроблено математичні моделі горизонтального та вертикального каналів наведення для безперервного та дискретного варіантів обчислення.
4. Проведено за допомогою створених математичних моделей моделювання всіх режимів роботи всіх створених цифрових стабілізаторів.
5. Проведено за допомогою розроблених математичних моделей роботи, що наведені у Розділах 4,5.
6. Запропоновано методику, що дозволяє усунути самовідводи БО та Б, що викликані дрейфом нульових сигналів гіротахметра, та призводять до відведення марки прицілу відносного вихідного положення у режимі «УПР». За цією методикою у режимі «УПР» вводиться подрежим «УПР-1», в якому обнулюються вхідні та запам'ятовуються вихідні сигнали інтегратора, на момент переходу в «УПР-1». При такій зміні програмно-алгоритмічного забезпечення сигнали наведення з ПУ безпосередньо надходять на суматор.

Список літератури до розділу 3

1. Терехин В.В. Основы моделирования в MATLAB. Часть 2. Simulink / В.В. Терехин // Учебное пособие. – Новокузнецк. РИО НФИ Кем ГУ. – 2004 – С.376.
2. Васильев В.В. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK /В.В. Васильев, Л.А. Симак,

А.М. Рыбникова// Учебное пособие. – Киев: Национальный авиационный университет. – 2008. – С. 91.

3. Бусленко Н.Г. Моделирование сложных систем / Н.Г.Бусленко //- М.: Наука. – 1978.- С. 400.

4. Елисеев, А.Д. Исследование быстродействующего привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения со статическим преобразователем / А.Д. Елисеев, Б.В. Новоселов // Оборонная техника.– 2011. – №8. – С. 24–29.

5. Елисеев, А.Д. Математическая модель статического преобразователя стабилизатора танкового вооружения как нелинейной импульсной системы / А.Д. Елисеев, В.А. Шаталов // Вопросы оборонной техники. Серия IX.– – 2012.–№6(258).

6. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учебник для ВУЗов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев // М.: Высшая школа. – 2001. –С. 343.

7. Егоренко Д. Л. Основы математического моделирования Построение и анализ моделей с примерами на языке Matlab / Д. Л. Егоренко, А.Л. Фратков, В.Ю. Харламов. Под. ред. д-ра техн. наук А.Л. Фраткова // Учеб. Пособие. СПб.: БГТУ.– 1994.

8. Кочергин В.В. Следящие системы с двигателем постоянного тока / В.В. Кочергин // Л.: Энергоатомиздат. – 1988.– С. 168.

9. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов // М.: Высш. шк. – 1994. – С. 318.

10. Семёнов А.С. Математическое моделирование режимов работы двигателя постоянного тока в среде MATLAB / А.С. Семёнов, В.М. Хубиева, М.Н. Петрова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-3. – С. 523-528; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39249> (дата обращения: 20.04.2020).

11. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов // М.: Наука. – 1975. – С. 768

12. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов // Физматлит, Москва. – 2005. – С. 320.

13. Елисеев А.Д. Модернизация привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения / А.Д. Елисеев // Вооружение. Технология. Безопасность. Управление. Материалы III научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых. В 3 ч. Часть 1. Ковров. – 2008. – С.157–161.

14. Шарма Д.Н. Уравнения в частных производных для инженеров / Д.Н. Шарма, К. Синг // Техносфера, Москва. – 2002. – С. 320.

15. Ханукаев Ю.И. О кватернионах. Конечные перемещения твердого тела и точки.[Электронный ресурс] / Ю.И. Ханукаев / Электронный журнал «Исследовано в России». – С. 338–346. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/033.pdf>.

16. Мелешко В.В. Методические указания к домашним заданиям по курсу "Теория и расчет приборов и систем" [Электронный ресурс]. / В.В. Мелешко // – Киев: НТУУ «КПИ» – 2011. – С. 81.

17. Веселов В.А. Гироскопические измерительные приборы и устройства. /В.А. Веселов, Р.Н. Гробовой, О.С. Ипатов, В.Г. Кузнецов, В.И. Медведев / Учебное пособие. Балтийский государственный технический университет. – 2003. – С. 122.

РОЗДІЛ 4.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ

В даному розділі наведено матеріали експериментальних досліджень, які виконані для підтвердження прийнятих технічних рішень, що розглянуті у попередніх розділах дисертаційної роботи.

Мета розділу – розробка методики проведення експериментальних досліджень для підтвердження запропонованих у дисертації теоретичних рішень.

Задача розділу – доступними засобами та методами експериментальних досліджень, у тому числі із застосуванням методів математичного моделювання, підтвердити достовірність технічних характеристик, які наведені у прийнятих схемо-технічних рішеннях.

Матеріали експериментальних досліджень [1] представлено у вигляді окремих викладок.

4.1. Експериментальні дослідження двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20 за оцінкою електромагнітної та електромеханічної постійних часу

Метою експериментальних досліджень є вимірювання на кожному із двигунів ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20 електромагнітної ($\tau_{\text{ЕЛ. МАГН.}}$) та електромеханічної постійних часу ($\tau_{\text{ЕЛ. МЕХ.}}$) [2-5].

4.1.1. Обсяг досліджень двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ЕЛ. МАГН.}}$

Випробування двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ЕЛ. МАГН.}}$ проводилися у складі приладової системи вимірювання механічних величин та стабілізації і на автономному робочому місці перевірки двигунів.

1. При випробуваннях у складі стабілізатора в обмотку загальмованого ЕДМ20М (ЕДМ02, ЕДМ20) подавались напруги від підсилювача БКД рівнем

27 В. Час подачі обмежувався до 20 мс за рахунок використання технологічного реле часу (Р. Ч.) у входному ланцюзі сигналу «СИГН. ШІМ» підсилювача БКД. Одночасно з подачею зазначеної напруги проводилося осцилографування:

- 1) Напруги, яка подавалась на обмотки двигуна (для використання цього параметру довідково);
- 2) Напруги на виході датчика струму (УДС) підсилювача БКД двигуна, що інформує про струм в обмотці. Перерахування значення струму проводилося тільки для максимальних значень $U_{ДС}$.

По осцилограмі $U_{ДС}$ (за формою: зростаюча експонента) визначалась постійна часу експоненти, що відповідає електромагнітний постійний часу двигуна (без врахування похибок, що внесені індуктивностями дроселів БКД та джерела живлення).

При випробуваннях за автономною схемою оцінка $\tau_{\text{ЕЛ. МАГН.}}$ двигуна проводилася за методикою, яка аналогічна випробуванням у складі стабілізатора, при наступних відмінностях:

- напруга в обмотку двигуна (далі $U_{\text{ЖИВ.ОБМ.}}$) подавалась рівнем 2,4 В на час ~ 25 мс.;
- у схемі автономних випробувань двигунів використане: джерело напруги постійного струму Б5-21, комутатор 831140А 27В, технологічне Р.Ч.;
- для виміру споживаного ЕДМ струму послідовно в обмотку двигуна був установлений шунт «75 мВ \times 50А».

4.1.2. Обсяг досліджень двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ЕЛ. МЕХ.}}$

Випробування проводилися в складі стабілізатора з двигунами, які було включено в режим холостого ходу.

Для виміру $\tau_{\text{ЕЛ. МЕХ.}}$ в обмотку ЕДМ подавалась напруга від БКД 27 В тривалістю ≈ 60 мс з одночасним осцилографуванням напруги $U_{ДС}$, а також напруги на обмотці двигуна (довідково).

По осцилограмі $U_{\text{ДС}}$ (за формою: спадаюча експонента) визначалася постійна часу експоненти, що відповідає електромеханічній постійній часу двигуна $\tau_{\text{ел. мех.}}$.

4.1.3. Результати досліджень двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ел. магн.}}$

На рис. 4.1.-4.3. наведені осцилограми напруги $U_{\text{ДС}}$ (з показаннями вимірюваного значення $\tau_{\text{ел. магн.}}$) для двигунів при випробуваннях у складі стабілізатора (характеризуються поданою в обмотки двигунів напругою $U_{\text{жив.обм}}$ рівним 27В).

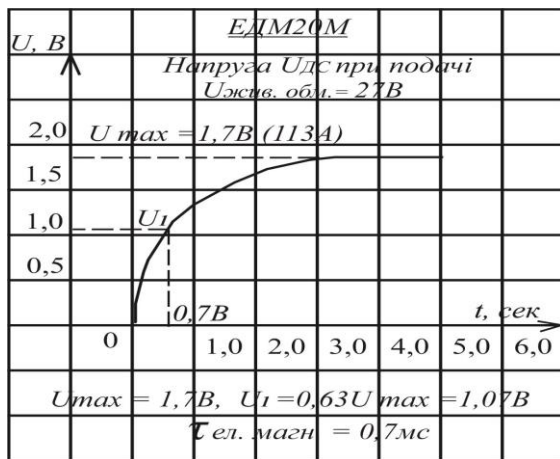


Рис. 4.1. Напруга $U_{\text{ДС}}$ ЕДМ20М при подачі $U_{\text{жив. обм.}} = 27\text{В}$

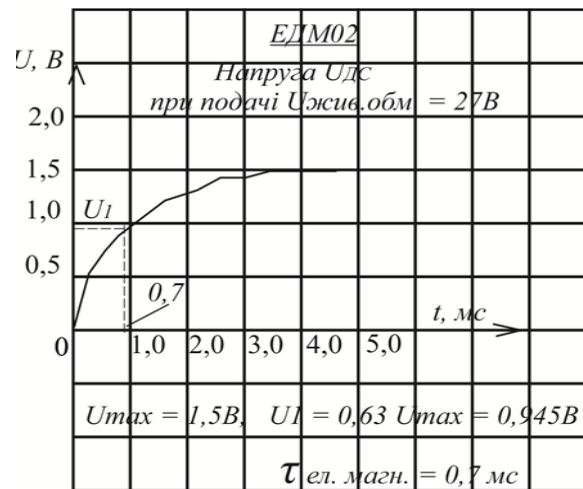


Рис. 4.2. Напруга $U_{\text{ДС}}$ ЕДМ02 при подачі $U_{\text{жив. обм.}} = 27\text{В}$

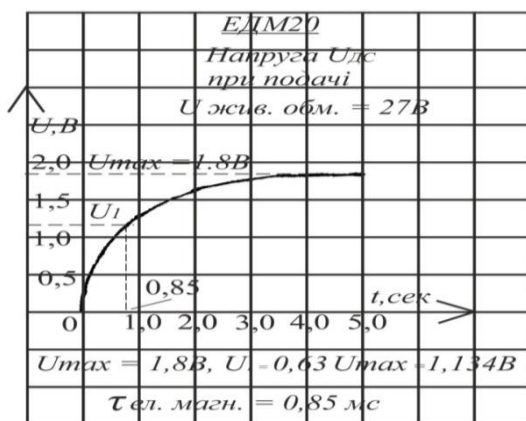


Рис. 4.3. Напруга $U_{\text{ДС}}$ ЕДМ20М при подачі $U_{\text{жив. обм.}} = 27\text{В}$

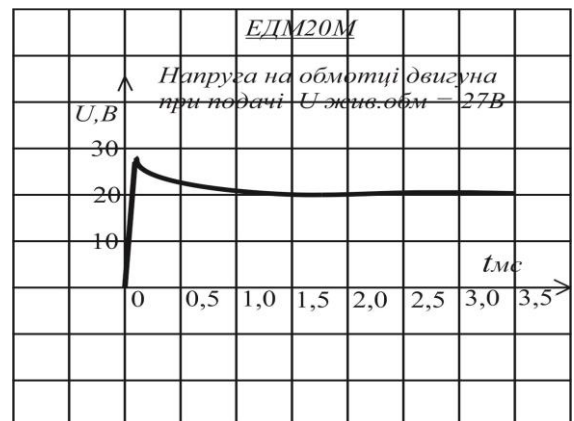


Рис. 4.4. Напруга на обмотці двигуна ЕДМ20М при подачі $U_{\text{жив. обм.}} = 27\text{В}$

На рис. 4.4 наведена осцилограма напруги на обмотці ЕДМ20М при подачі $U_{\text{жив.обм.}} = 27\text{В}$ (аналогічна для ЕДМ02, ЕДМ20 при незначних відмінностях).

Характеризується зменшенням напруги на 8В протягом 3,5 мс з моменту подачі $U_{\text{жив.обм.}}$ через осідання джерела живлення $=27\text{В}$ та спаду напруги на монтажі та на електро-радіо виробих підсилювача БКД.

На рис. 4.7 наведені осцилограми напруги на шунті «75 мВ х 50А» при подачі в обмотки двигунів напруг $U_{\text{жив.обм.}} = 2,4\text{В}$ (автономні випробування ЕДМ).

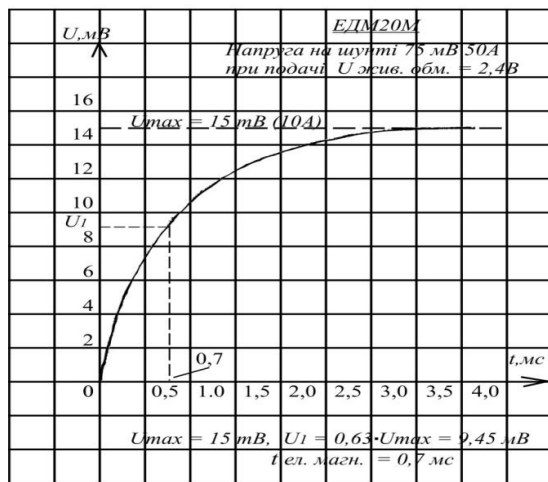


Рис. 4.5. Напруга на шунті 75мВ 50А на ЕДМ20М при подачі $U_{\text{жив.обм.}}=2,4\text{В}$

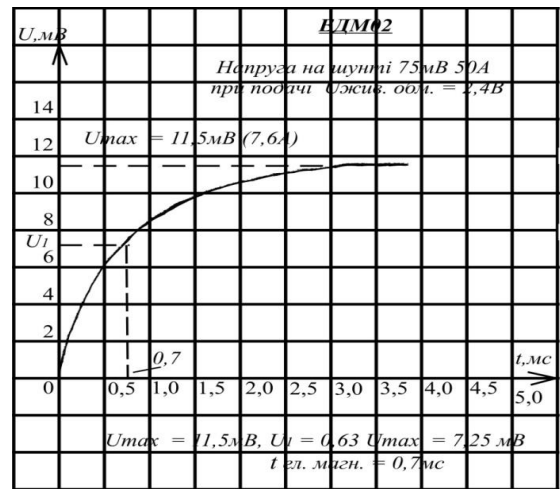


Рис.4.6. Напруга на шунті 75мВ 50А на ЕДМ02 при подачі $U_{\text{жив.обм.}}=2,4\text{В}$

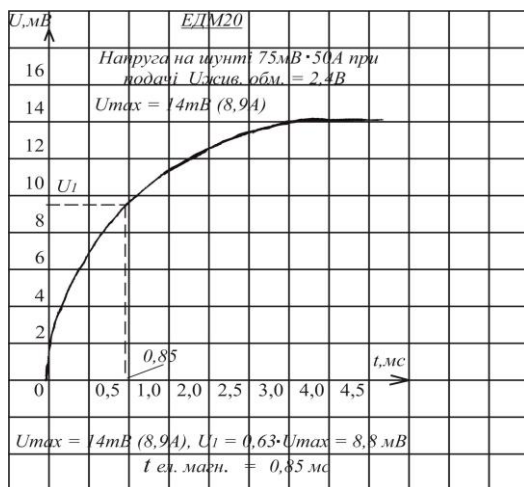


Рис. 4.7. Напруга на шунті 75мВ 50А двигунів на ЕДМ02 при подачі $U_{\text{жив.обм.}}=2,4\text{В}$



Рис.4. 8. Напруга на обмотці при подачі $U_{\text{жив.обм.}}=2,4\text{В}$

На рис. 4.8 наведена осцилограма напруги на обмотці двигуна, при подачі $U_{\text{жив.}} = 2,4 \text{ В}$ (ідентична для ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20). Відзначається зменшення напруги на обмотці на $0,2\text{В}$ протягом 1 мс із моменту подачі $U_{\text{жив.обм.}}$ при наступній його стабільності.

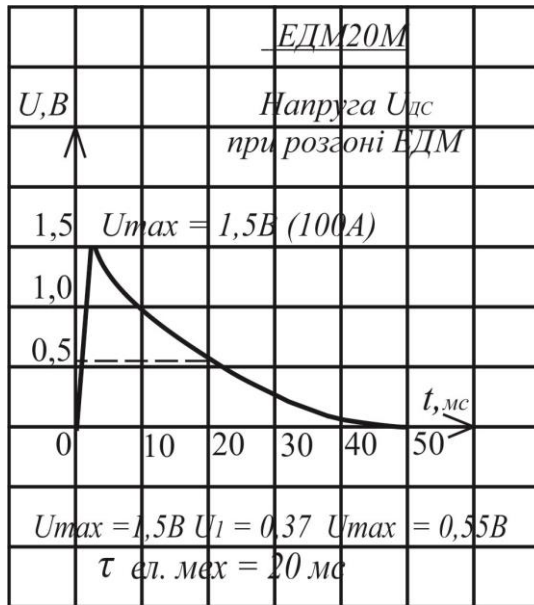


Рис. 4.9. Напруга $U_{\text{дс}}$ при розгоні ЕДМ20М

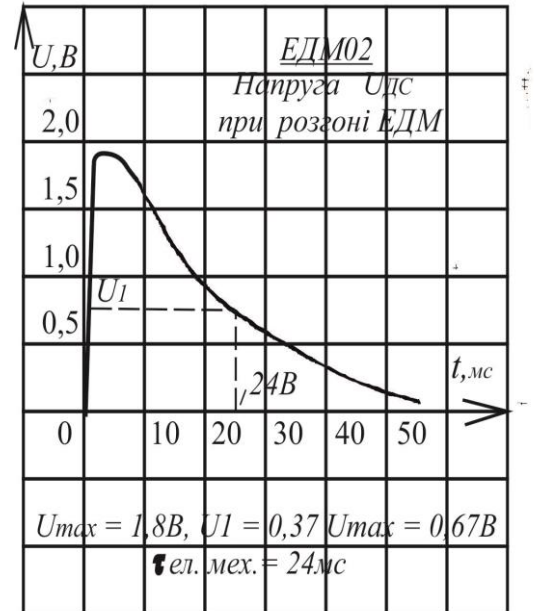


Рис. 4.10. Напруга $U_{\text{дс}}$ при розгоні ЕДМ02

4.1.4. Результати досліджень двигунів за оцінкою $\tau_{\text{ел. мех.}}$

На рис. 4.9. - 4.11. наведені осцилограми напруг $U_{\text{дс}}$ при розгоні в режимі холостого ходу ЕДМ при подачі $U_{\text{жив.обм.}} = 27\text{В}$ (з вказівкою обмірюваних значень $\tau_{\text{ел. мех.}}$).

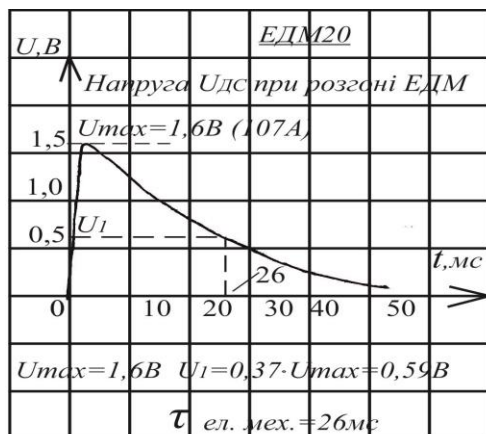


Рис. 4.11. Напруга $U_{\text{дс}}$ при розгоні ЕДМ20



Рис. 4.12. Напруга на обмотках двигунів

На рис. 4.12 наведена осцилограма напруги на обмотці двигуна (ідентична для ЕДМ20М, ЕДМ02, ЕДМ20) при розгоні ЕДМ у момент подачі $U_{\text{жив.обм.}} = 27\text{В}$.

За результатами вимірів встановлено:

1. Електромагнітні постійні часу становлять:

0,7 мс - для ЕДМ20М;

0,7 мс - для ЕДМ02;

0,85 мс - для ЕДМ20

2. Електромеханічні постійні часу становлять:

20 мс - для ЕДМ20М;

24 мс - для ЕДМ02;

26 мс - для ЕДМ20

4.2. Експериментальне визначення смуги пропускання гіротахометра ГТ46

Мета проведених випробувань - експериментально визначити фактичну полосу пропускання [6,7] електромеханічних гіротахометрів ГТ46.

Роботи щодо експериментального дослідження смуги пропускання виконувались на одному із зразків ГТ46 у два етапи.

На першому етапі за результатами досліджень перехідних процесів гіротахометра ГТ46 були отримані передатні функції ГТ46.

Дослідження проводились при таких початкових умовах: Сигнал з датчика кута ГТ46 при вимкненому гіромоторі склав: по змінному струму 36,33 мВ, по постійному струму 25 мВ. Обмежувачі кута повороту підвісу знаходились на кутах повороту в обидві сторони, що відповідають напрузі 11,85 В ($3 \pm 0,5$) град. Проводились відхилення підвісу до упору спочатку в одну, а потім в іншу сторону. Сигнал с датчика кута ГТ46 у процесі його приведення у нуль, записувався на осцилограф GDS2204.

Для отримання параметрів передатної функції гіротахометрів були записані осцилограми (рис. 4.13, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, 4.23, 4.25) перехідних процесів, які

були піддані математичній обробці. За результатами робіт, які виконані на першому етапі, отримані передатні функції ГТ46 (формули 4.1-4.7).

На другому етапі робіт за передатними функціями побудовані логарифмічні амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики [8, 9] (рис. 4.14, 4.16, 4.18, 4.20, 4.22, 4.24, 4.26).

За амплітудно-частотними та фазово-частотними характеристиками визначена смуга пропускання, що дорівнює частоті, на якій падіння коефіцієнта підсилення становить 3 Дб.

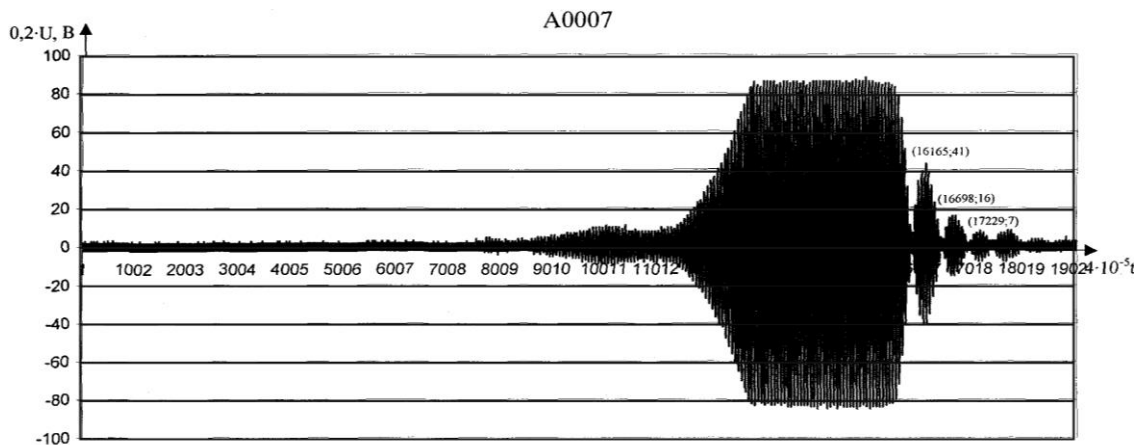


Рис. 4.13. Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 1

$$T = (17229 - 16165) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04256 \text{ с}; \quad f = \frac{1}{T} = 23,4962 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 147,6312 \text{ рад/сек}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{41}{46} = 44,21914;$$

$$q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 154,1114; \quad \zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,28693.$$

$$W(p) = \frac{k}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{k}{1 + 0,003724p + 4,21047 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}.$$

$$\text{Передаточна функція гіротахометра: } W_1(p) = \frac{11,04}{4,21 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003724p + 1};$$

де, U – вихідна напруга гіротахометра [В]; ω – вимірювана кутова швидкість

[рад/с]; $K_{ГТ} = \frac{H \cdot K_{ДУ}}{C} = 11,04 \frac{\text{В} \times \text{с}}{\text{рад}}$ – статичний коефіцієнт передачі;

$T_0 = \sqrt{\frac{I_n}{C}} = 0,00673 \text{ с}$ – постійна часу; $\zeta = 0,5 \div 0,75$ – відносний коефіцієнт демпфірування; $H = 0,359 \text{ Нмс}$ – кінетичний момент; $C = 7,45 \text{ Нм/рад}$ – жорсткість торсіону; $K_{ДК} = 229,2 \text{ В/рад}$ – крутість вихідної характеристики датчика кута; $I_n = 3,38 \cdot 10^{-4} \text{ Нмс}$ – момент інерції підвісу.

$$\text{Передатна функція гіротахометра } W_1(p) = \frac{11,04}{4,21 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003724 p + 1} \quad (4.1)$$

Смуга пропускання 35,9 Гц

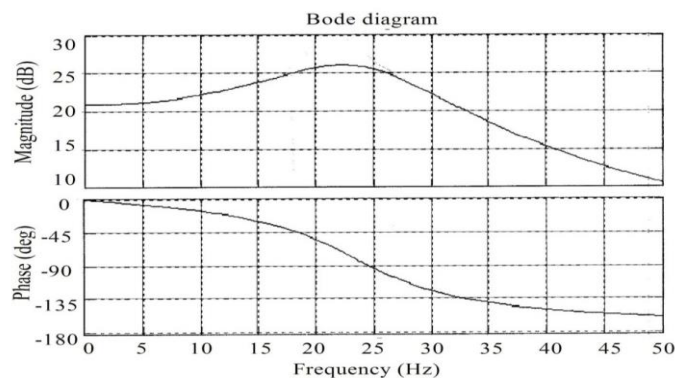


Рис. 4.14. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 (за варіантом 1)

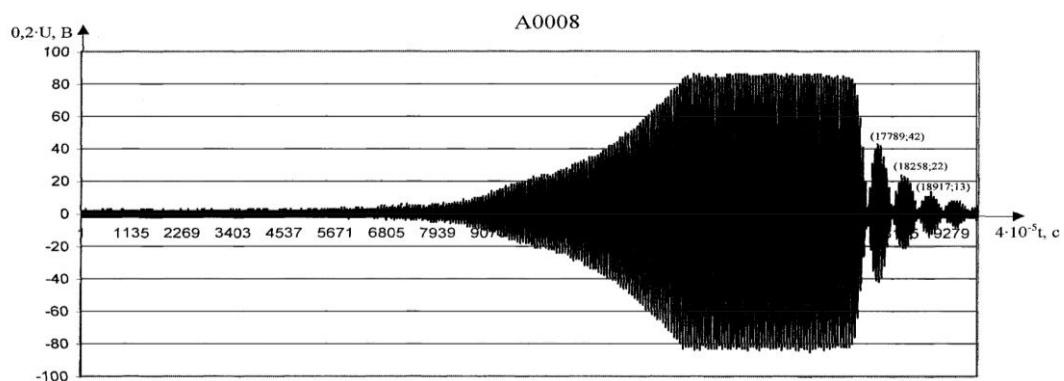


Рис. 4.15. Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 2

$$T = (18917 - 17789) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04512 \text{ с}; \quad f = \frac{1}{T} = 22,16312 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 139,255 \text{ рад/с}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{42}{22} = 28,66255; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 142,1742;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,2016; W(p) = \frac{k}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{k}{1 + 0,002836p + 4,94719 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}.$$

$$\text{Передатна функція гіротахометра } W_2(p) = \frac{11,04}{1 + 0,002836p + 4,94719 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}. \quad (4.2)$$

Смуга пропускання 33 Гц

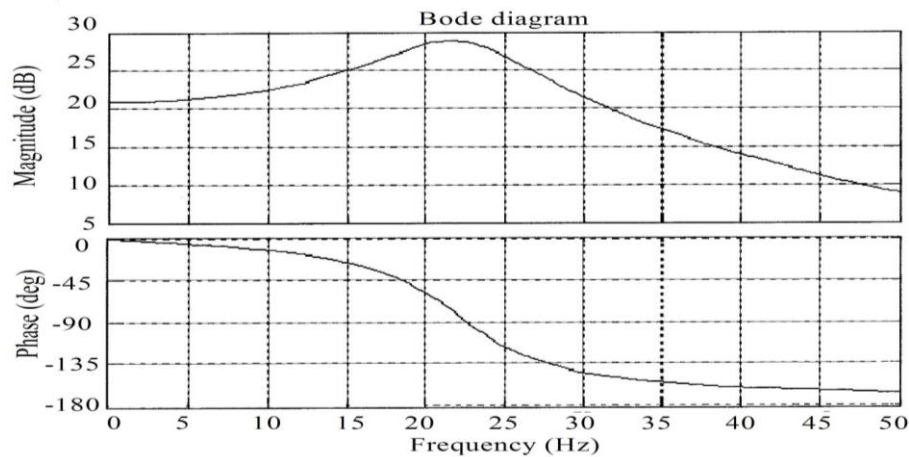


Рис. 4.16. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики

ГТ46 за варіантом 2

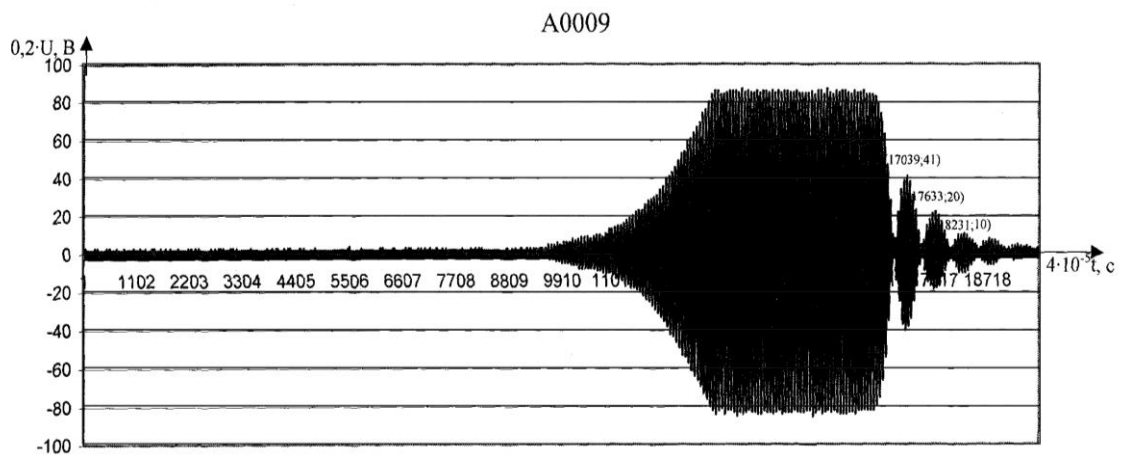


Рис. 4.17. Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 3

$$T = (18231 - 17039) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04768 \text{ с}; f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,04768} = 20,973 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 131,778 \text{ рад/с}; \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{41}{20} = 30,1107; q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 135,1745;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,222754; \quad W(p) = \frac{K_{\Gamma T}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{\Gamma T}}{1 + 0,003296p + 5,47281 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}$$

$$\text{Передатна функція гіротахметра } W_3(p) = \frac{11,04}{1 + 0,003296p + 5,47281 \cdot 10^{-5} \cdot p^2} \quad (4.3)$$

Смуга пропускання 32,2 Гц

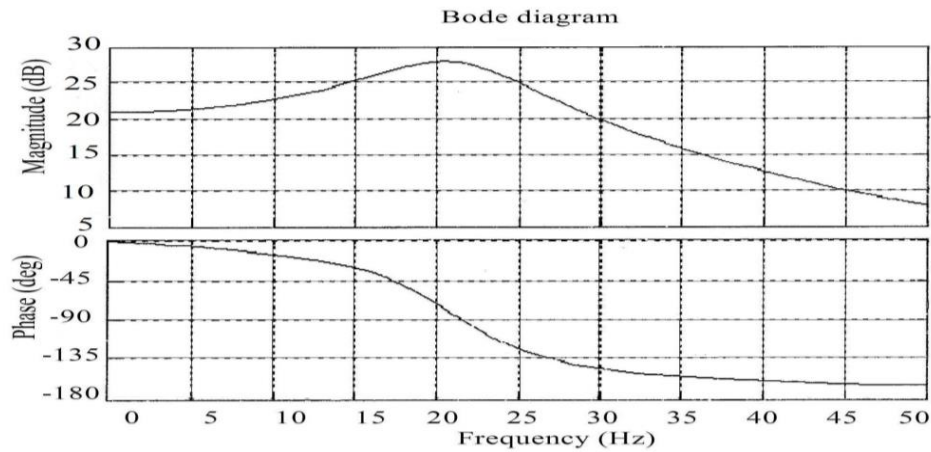


Рис. 4.18. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики

ГТ46 за варіантом 3

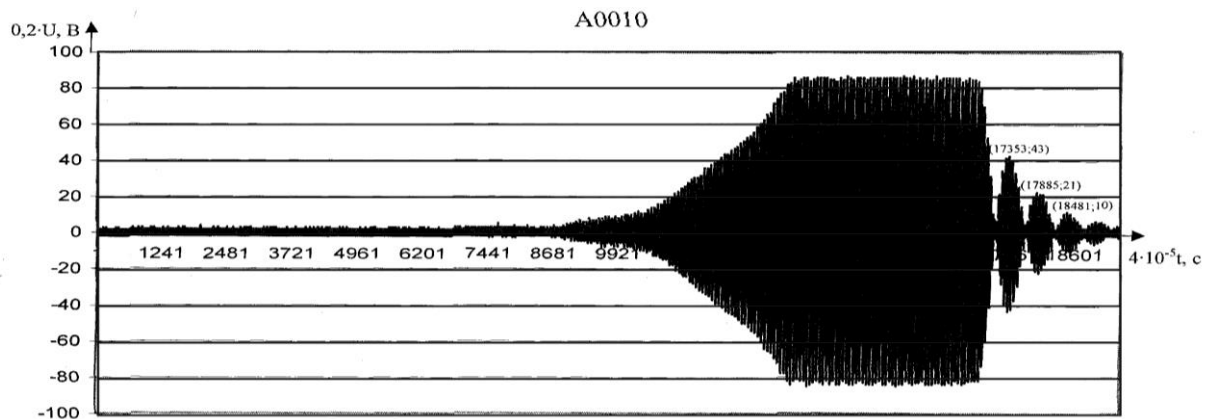


Рис. 4.19. Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 4

$$T = (18917 - 17789) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04512 \text{ c}; \quad f = \frac{1}{T} = 22,16312 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 139,255 \text{ рад/с}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{43}{21} = 31,7676; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 142,8325;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,222412; \quad W(p) = \frac{K_{\Gamma T}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{\Gamma T}}{1 + 0,0031143p + 4,90169 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}.$$

Передатна функція гіротахметра $W_4(p) = \frac{11,04}{1 + 0,0031143p + 4,90169 \cdot 10^{-5} \cdot p^2} \cdot (4.4)$

Смуга пропускання 34,1 Гц

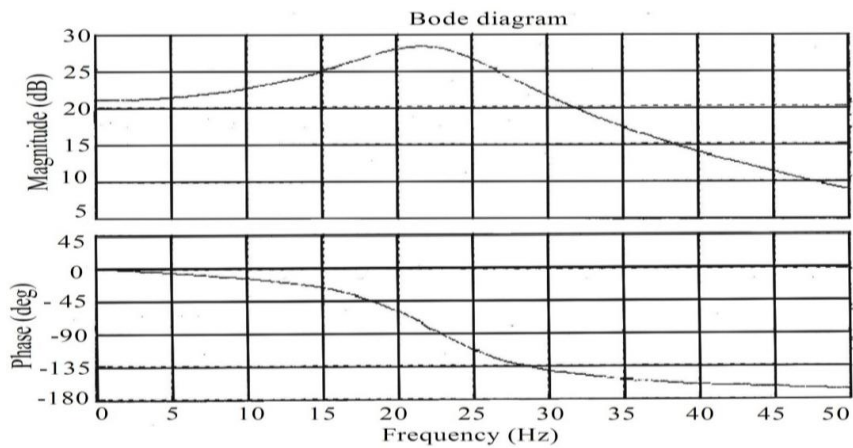


Рис. 4.20. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики

ГТ46 за варіантом 4

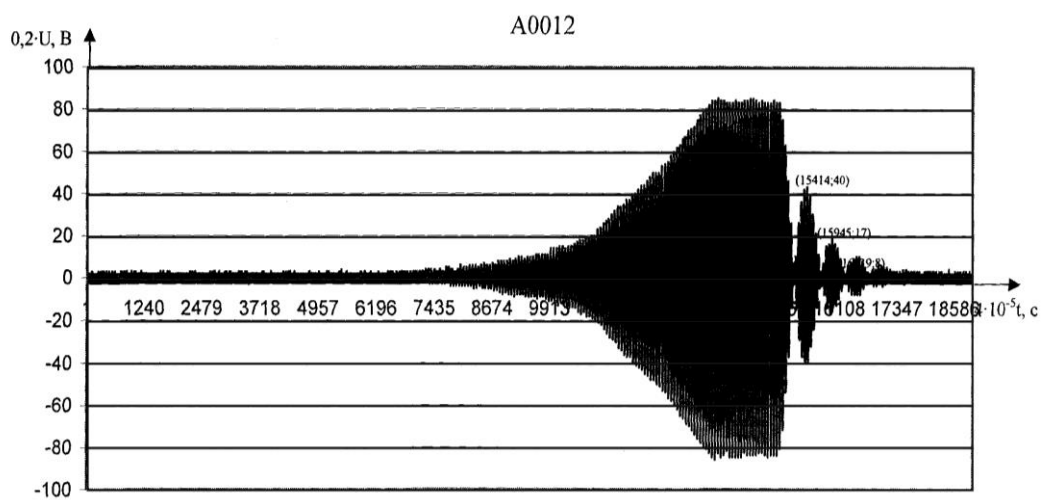


Рис. 4.21. Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 5

$$T = (16539 - 15414) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,045 \text{ с}; \quad f = \frac{1}{T} = 22,2222 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 139,6263 \text{ рад/с}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{40}{17} = 38,0296; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 144,7127;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,26279; \quad W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,0036319p + 4,7752 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}.$$

$$\text{Передатна функція гіротахометра } W_5(p) = \frac{11,04}{1 + 0,0036319p + 4,7752 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}. \quad (4.5)$$

Смуга пропускання 34 Гц

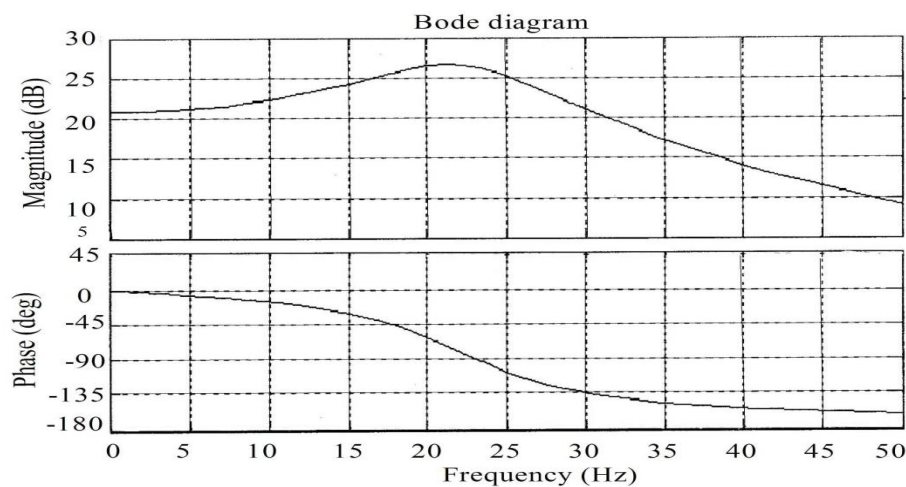


Рис. 4.22. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 за варіантом 5

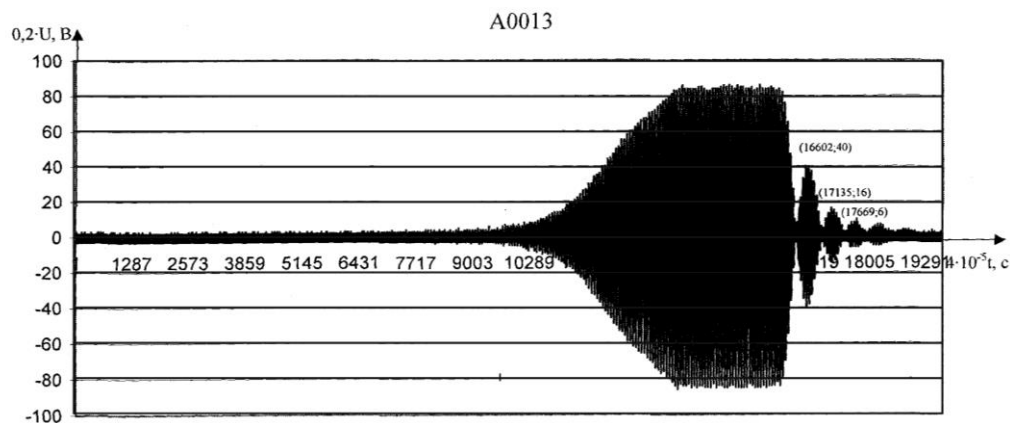


Рис. 4.23. Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 6

$$T = (17669 - 16602) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04268 \text{ с}; \quad f = \frac{1}{T} = 23,43018 \text{ Гц};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 147,2162 \text{ рад/с}; \quad \gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{40}{16} = 42,93771; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 153,3501;$$

$$\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,279998; \quad W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,0036517p + 4,25238 \cdot 10^{-5} \cdot p^2};$$

$$\text{Передатна функція гіротахометра } W_6(p) = \frac{11,04}{1 + 0,003652p + 4,252 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}. \quad (4.6)$$

Смуга пропусцення 35,8 Гц

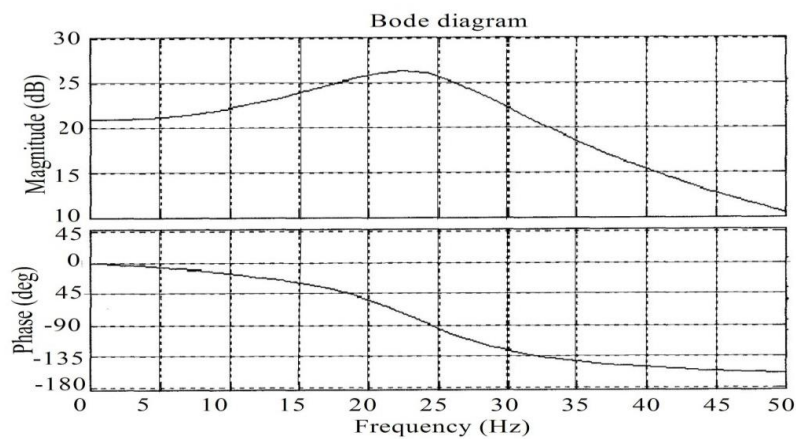


Рис. 4.24. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 за варіантом 6

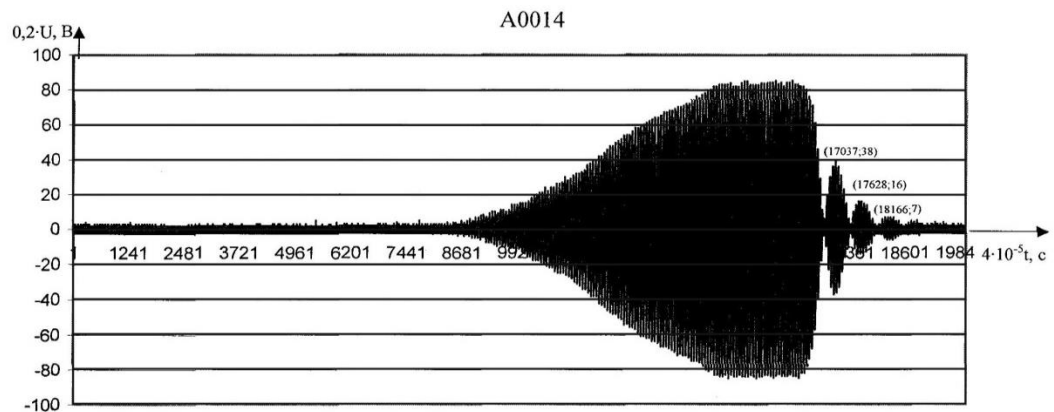


Рис. 4.25. Осцилограма перехідних процесів ГТ46. Варіант 7

$$T = (18166 - 17037) \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 0,04516 \text{ с}; \quad f = \frac{1}{T} = 22,14 \text{ Гц}; \quad \lambda = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 139,1316 \text{ рад/с};$$

$$\gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2} = \frac{2}{T} \ln \frac{38}{16} = 38,30812; \quad q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2} = 144,3091; \quad \zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}} = 0,265459;$$

$$W(p) = \frac{K_{ГТ}}{1 + \frac{2\zeta}{q} \cdot p + \frac{p^2}{q^2}} = \frac{K_{ГТ}}{1 + 0,003679p + 4,80189 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}.$$

$$\text{Передатна функція гіротахometра } W_7(p) = \frac{11,04}{1 + 0,003679p + 4,80189 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}. \quad (4.7)$$

Смуга пропускання 33,9 Гц

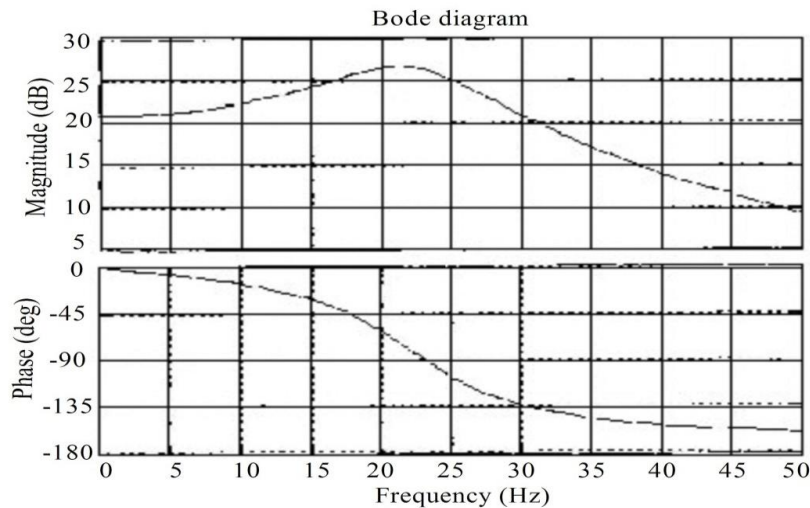


Рис. 4.26. Амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики ГТ46 за варіантом 7.

За результатами проведених досліджень можна стверджувати, що смуга пропускання ГТ46 для різних варіантів передатних функцій знаходиться у діапазоні 31-36 Гц. Найбільша смуга пропускання для гіротахometра з передатною функцією (варіант 1):

$$W_1(p) = \frac{11,04}{4,21 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,003724p + 1} \quad (4.1)$$

4.3. Дослідження зміни моделі побудови стабілізатора з метою підвищення точності

З метою вивчення можливості підвищення точнісних характеристик стабілізатора було проведено моделювання з використанням як традиційного датчика кутової швидкості (ДКШ) ГТ46, так і сенсору нового типу, заснованого на MEMS-технології G20-075-100.

Використання нових твердотільних ДКШ є одним з основних напрямків сучасного приладобудування. Такі датчики мають широку область застосування, у тому числі, стабілізацію платформ із установленими на них вимірювальними пристроями й системи керування рухомими об'єктами різного класу, вимірювальні блоки для інерціальної навігації.

Одночасно з гіротахометром ГТ46 [11] та ДКШ КВГ [12] була проведена оцінка впливу полоси пропускання та дискретності обчислення з використанням ДКШ MEMSG20-075-100 [13,14] з полосою пропускання 100 Гц і ВОГ ВГ910Ф [15] з полосою пропускання 450 Гц.

При моделюванні використовувались обчислювальні схеми гіроскопічних вимірювачів ГТ46, G20-075-100 та ВГ910Ф, які представлені у розділі 2 на рис. 2.2, а технічні характеристики цих ДКШ наведені, відповідно, у таблицях 2.1, 2.3, 2.4.

Дослідження можливості підвищення точності стабілізатора з урахуванням уведення ДКШ нового типу було проведено з урахуванням таких основних положень, як оптимізація параметрів посилення ДКШ та постійної часу інтегратора, а також налаштувальних коефіцієнтів у контурах керування.

Оптимізація проводилася на підставі мінімізації H_2 - норми замкненої передатної функції лінійної моделі стабілізатора

$$H_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}(W(j\omega)^* W(j\omega)) d\omega}, \quad (4.8)$$

де, $W(j\omega)$ - передатна функція замкненої системи стабілізації,

* - символ комплексно - сполученої матриці.

Обраний критерій забезпечує високу точність процесів керування з урахуванням можливості зміни параметрів системи.

У процесі оптимізації були визначені наступні варіанти оптимальних значень налаштувальних коефіцієнтів блоку управління, які наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Оптимальні значення налаштувальних коефіцієнтів блоку управління

	Коефіцієнт підсилення тракту управління $U(0 \div 136)$	Коефіцієнт передачі сигналу гіротахметра $IT(0 \div 125)$	Коефіцієнт передачі в ланцюзі зворотного зв'язку по струму $DT(0 \div 125)$
Варіант 1	102	9	10
Варіант 2	85	7	8
Варіант 3	44	6	8
Варіант 4	102	7	10
Варіант 5	109	6	2
Варіант 6	109	7	2

В основу аналізу результатів моделювання були покладені оцінка динамічної погрішності стабілізатора і його реакція на імпульсний вплив.

Оцінка динамічної погрішності стабілізатора проводилася на підставі дослідження реакції на гармонійний сигнал, що подавався на вхід ДКШ (рис. 4.27).

Амплітуда та частота змінення сигналу, що відповідає коливанням корпусу виробу з амплітудою $2,5^\circ$ та частотою 0,8 Гц, аналогічні методам випробувань 2Э52 [16].

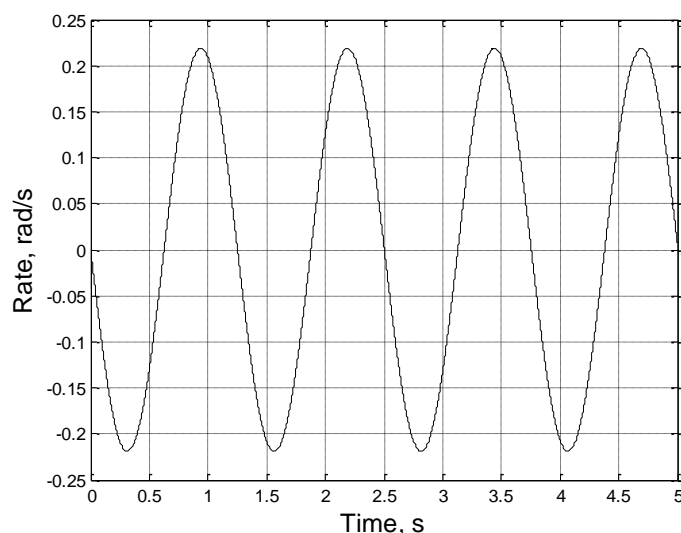


Рис. 4.27. Гармонійний вплив, що задається на вході ДКШ

Оцінка імпульсного впливу проводилася на підставі дослідження реакції на послідовність імпульсів, що подавались на вхід ДКШ. Параметри імпульсних впливів приймалися у відповідності з даними, які отримані при проведенні ударних випробувань в польових умовах - тривалість імпульсу 5,0 мс з амплітудою 0,5 рад/с, що відповідає вихідному сигналу ГТ46 на рівні 6В.

4.3.1. Результати досліджень щодо впровадження нових ДКШ

У процесі моделювання [17,18] були розглянуті варіанти налаштувальних коефіцієнтів блоку керування, значення яких наведені в табл. 4.1. Моделювання виконувалося на прикладі горизонтального каналу блоку управління.

Для перших трьох варіантів налаштувальних коефіцієнтів проводилося порівняльне моделювання з використанням двох типів сенсорів: ГТ46 та G20-075-100 зі смугою пропускання 100 Гц. Результати моделювання для першого варіанта налаштування представлені на рис.4.28 та 4.29. Відомо, що збільшення коефіцієнта підсилення позитивно впливає на жорсткість системи.

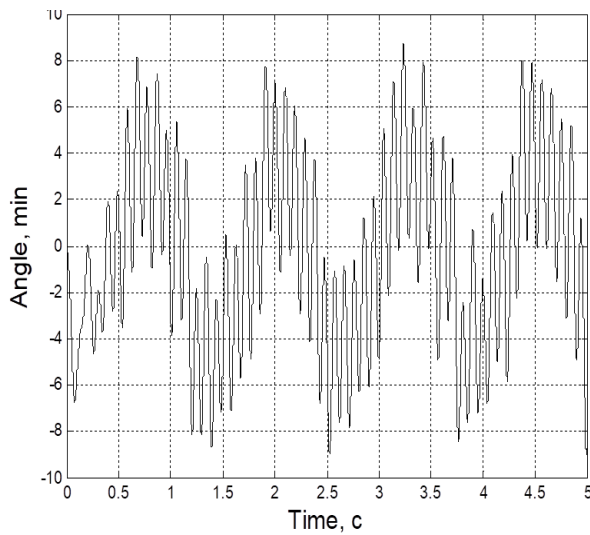


Рис. 4.28. Динамічна похибка
стабілізатора з ГТ46 при заданні
сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$
для варіанта 1 налаштування

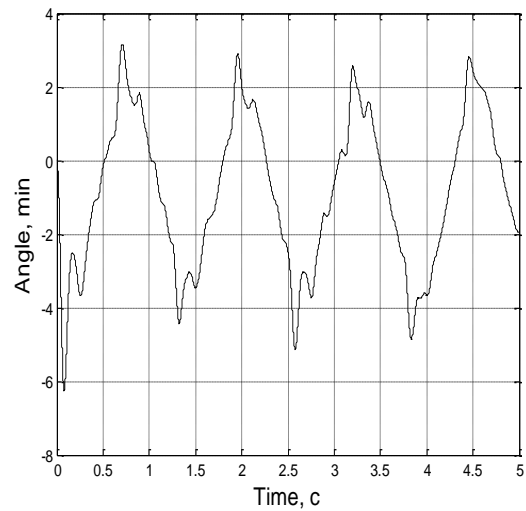


Рис. 4.29. Динамічна похибка
стабілізатора з G20-075-100 при
заданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$
для варіанта 1 налаштування

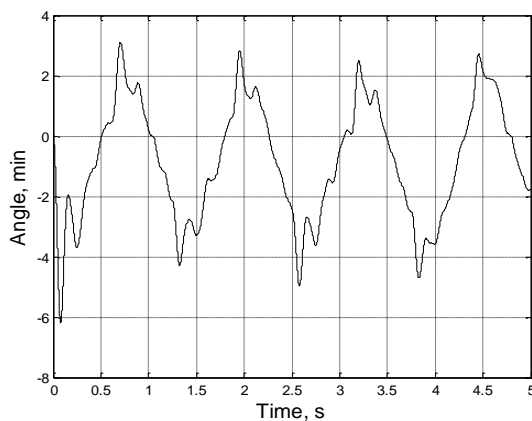


Рис. 4.30. Динамічна похибка
стабілізатора з G20-075-100 при
заданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$
для варіанта 1 налаштування $K_y=109$

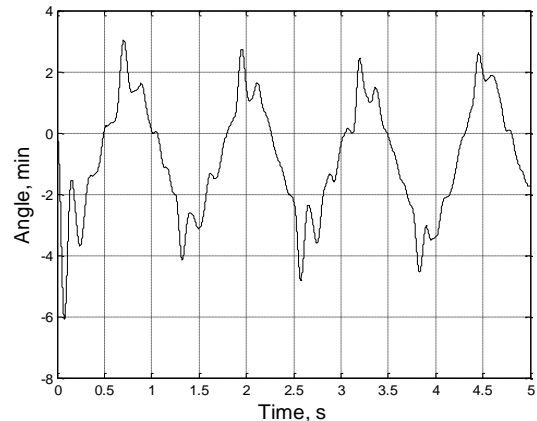


Рис. 4.31. Динамічна похибка
стабілізатора з G20-075-100 при
заданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$
для варіанта 1 налаштування $K_y=116$

Найбільшим коефіцієнтом підсилення характеризується варіант 1 налаштувальних коефіцієнтів. На відміну від стабілізатора з використанням ГТ46, введення ДКШ МЕМС дозволяє збільшувати коефіцієнт підсилення й тим самим підвищити жорсткість системи. Результати моделювання показали, що прийнятна динамічна помилка зберігається при подальшому збільшенні коефіцієнта підсилення до $K_y=109$ і $K_y=116$. Збільшення коефіцієнта K_y до

значення 122 призводить до збільшення коливальності динамічної помилки стабілізатора. Результати моделювання при збільшенні коефіцієнта підсилення до 109 і 116 представлені на рис. 4.30 та 4.31. Результати моделювання для другого й третього варіантів налаштування представлені на рис. 4.32-4.34.

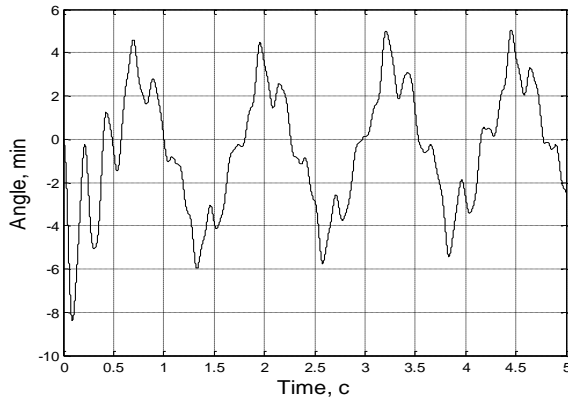


Рис. 4.32. Динамічна похибка стабілізатора з ГТ46 при завданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 2 налаштування

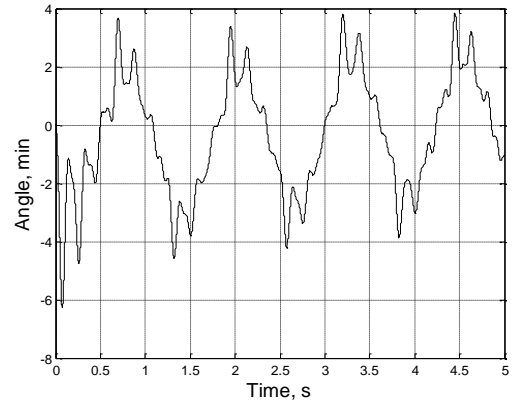


Рис. 4.33. Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 2 налаштування

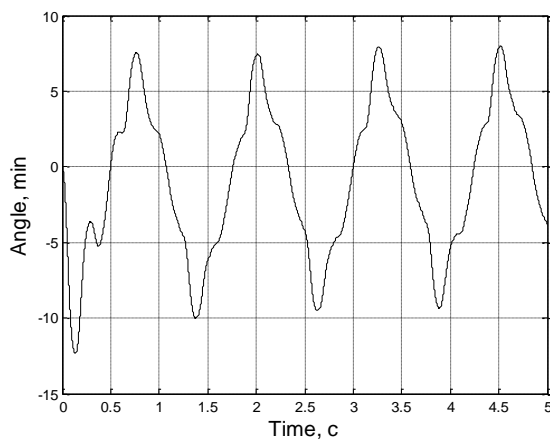


Рис. 4.34. Динамічна похибка стабілізатора з ГТ46 при завданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 3 налаштування $K_V=44$

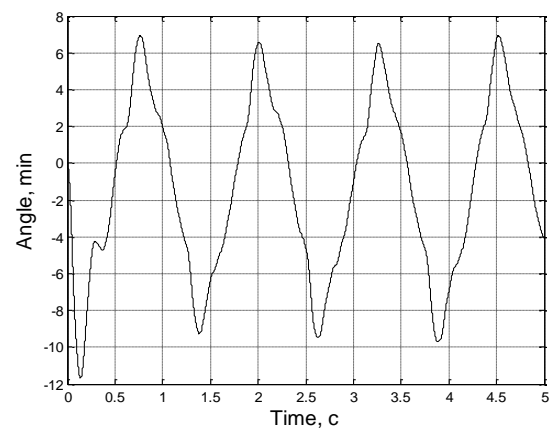


Рис. 4.35. Динамічна похибка стабілізатора з G20-075-100 при завданні сигналу $0,219\cos(5,02t + \frac{\pi}{2})$ для варіанта 3 налаштування $K_V=44$

Аналіз рис. 4.30-4.35 показує, що зі зменшенням коефіцієнта підсилення характер зміни амплітуди динамічної помилки для ДКШ ГТ-46 та G20-075-100 збігається. Це дає можливість припускати, що високочастотні коливання, які мають місце на рис. 4.28., обумовлені досить високим коефіцієнтом підсилення

$K_y=102$. Крім того, слід урахувати те, що до складу стабілізатора із ГТ46 входить смуговий фільтр для зменшення резонансних частот (рис. 4.36). Застосування ДКШ МЕМС, що характеризуються високими резонансними частотами, дозволяє виключити смуговий фільтр із складу стабілізатора.

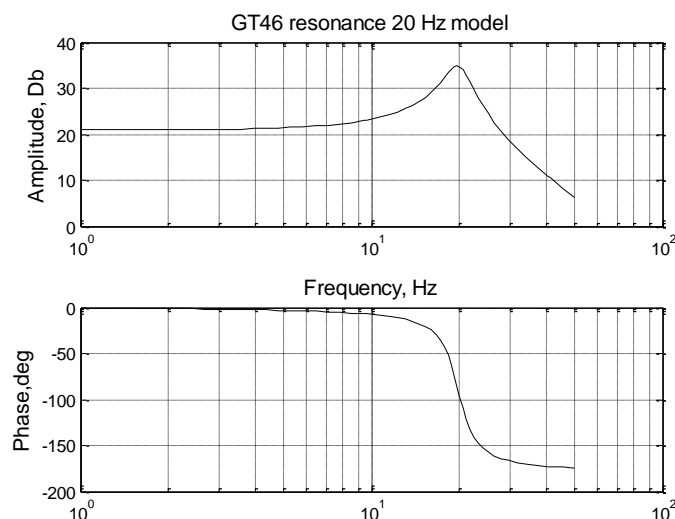


Рис. 4.36. ЛАЧХ ГТ46 з резонансом 20 Гц

Зі зменшенням коефіцієнта підсилення до 44 (рис. 4.34 та 4.35, що відповідають варіанту 3 налаштування) амплітуда динамічної помилки й характер її зміни стають ідентичними. При цьому, амплітуда динамічної помилки стабілізатора перевищує припустиме значення в 2 рази.

4.3.2. Результати досліджень впливу смуги пропускання

Результати дослідження впливу ширини смуги пропускання ДКШ на завадостійкість стабілізатора представлені на рис. 4.37 – 4.40, де задаються смуги пропускання 100 Гц, 200 Гц, 300 Гц, 400 Гц відповідно. При цьому використовується варіант 4 налаштувальних коефіцієнтів табл. 4.1. Графічні дані з наведених рисунків демонструють, що зі збільшенням смуги пропускання ДКШ забезпечується більш плавне відпрацьовування гармонійного впливу, що задається. При цьому виконуються вимоги щодо точності стабілізатора, які зазначені в технічному завданні – динамічна похибка не перевищує 1 т.д. (3.6 кут. хв).

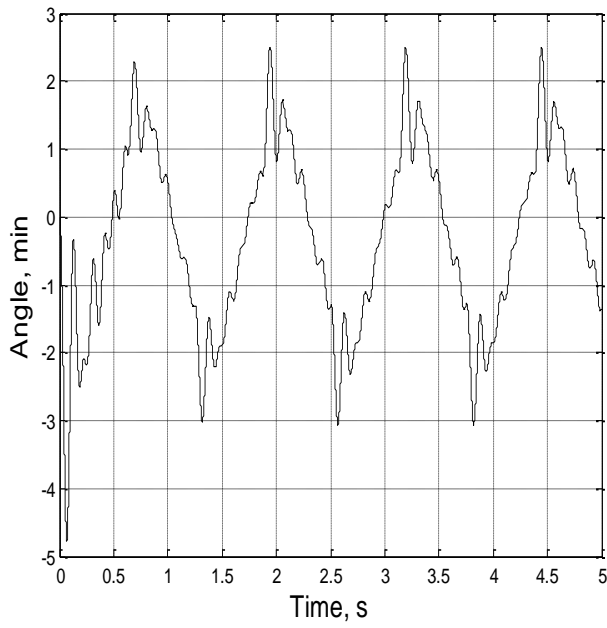


Рис. 4.37. Динамічна похибка
при смузі пропускання ДКШ 100 Гц

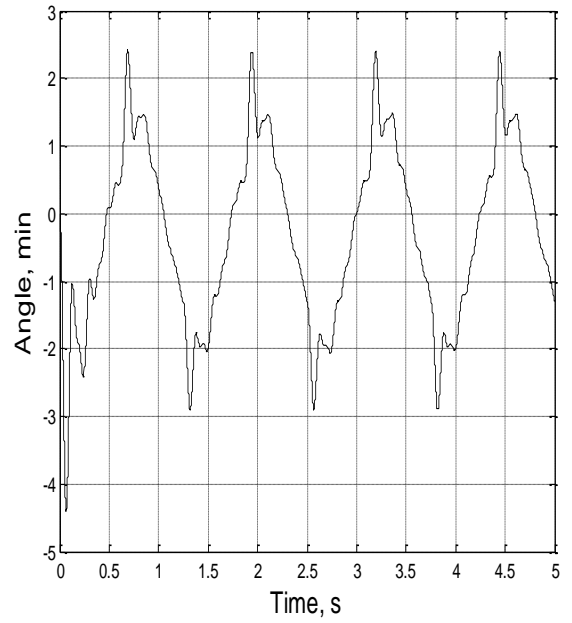


Рис. 4.38. Динамічна похибка
при смузі пропускання ДКШ 200 Гц

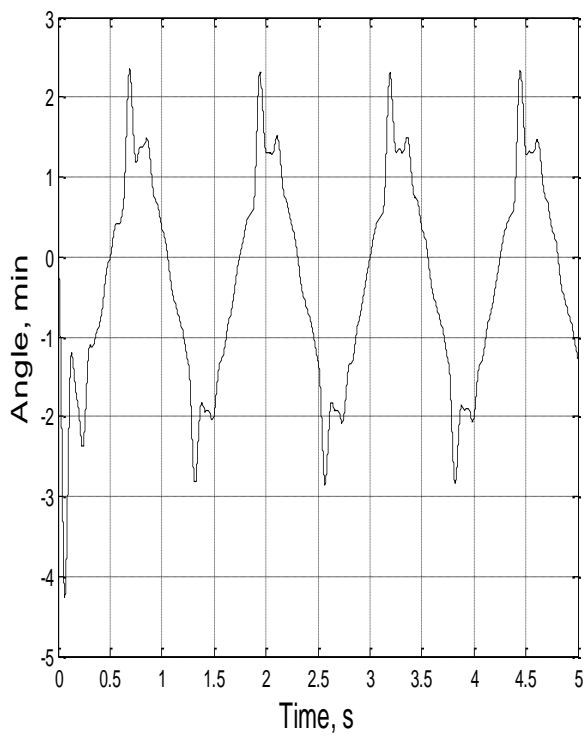


Рис. 4.39. Динамічна похибка
при смузі пропускання ДКШ 300 Гц

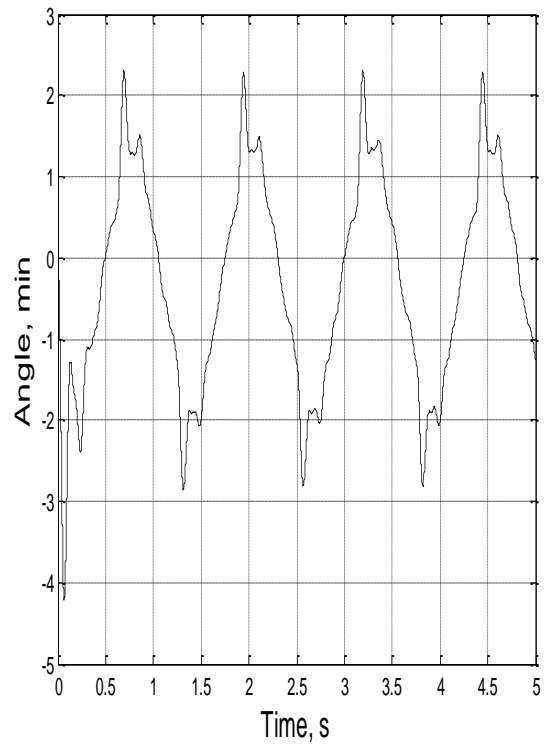


Рис. 4.40. Динамічна похибка
при смузі пропускання ДКШ 400 Гц

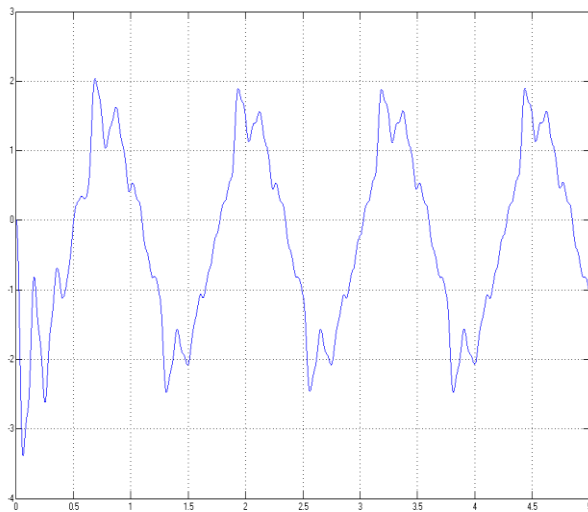


Рис. 4.41. Динамічна похибка СО
при дискретності 1,0 мс
для ВГ910Ф

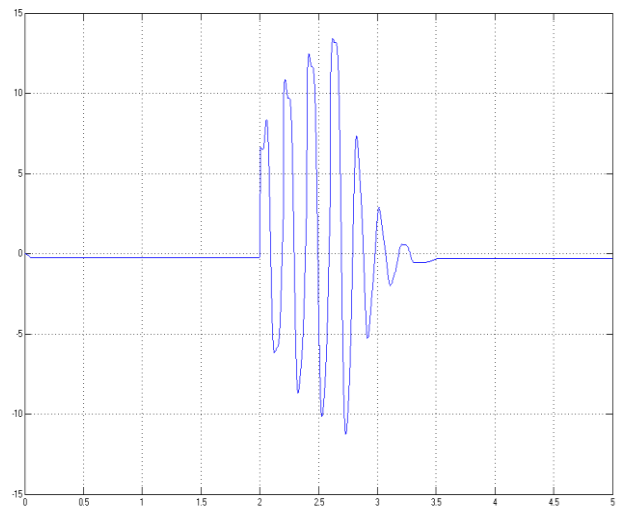


Рис. 4.42. Відпрацювання послідовності
імпульсів при дискретності 1,0 мс
для ВГ910Ф

4.3.3. Моделювання зміни дискретності обчислення сигналів керування з КВГ

З урахуванням отриманих результатів було проведено моделювання роботи стабілізатора з введенням ДКШ КВГ до вертикального каналу стабілізатора, тому що на вертикальний канал діють більш інтенсивні збудження.

Мета моделювання - порівняння погрешностей стабілізатора вертикального каналу стабілізатора з урахуванням введення в математичну модель стабілізатора моделі коріолісового вібраційного гіроскопу (КВГ) (рис. 2.2 б) у режимах, коли смуга пропускання КВГ приймалась на рівні 100 Гц, а дискретність обчислень приймалась на рівні 1,7 мс та 1,0 мс у різних режимах:

- 1) Зміни кутового положення БО при русі виробу по пересіченій місцевості;
- 2) При впливі імпульсних збурювань (відпрацювання послідовності імпульсів).

На рис. 4.43 та 4.44 наведені результати моделювання руху виробу по пересіченій місцевості у відповідності з наступною циклограмою:

- ділянка (1) відповідає розгону корпусу виробу по куту;
- ділянка (2) відповідає зміні кутового положення корпусу виробу зі сталою швидкістю;

- ділянка (3) відповідає гальмуванню корпусу виробу;
- ділянка (4) відповідає руху корпусу виробу по горизонтальній площині.

За результатами моделювання встановлено, що при розвороті корпусу виробу похибка блоку озброєння (БО), що встановилася (відхилення від вихідного положення), становить 5 кут. хв. при дискреті обчислення 1,7 мс (рис. 4.43) та не перевищує 2 кут. хв (рис. 4.44) при дискреті обчислення 1,0 мс. Позначення на рис. 4.43 та 4.44 відповідають: 1 – розгін корпусу виробу; 2 – рух корпусу виробу з сталою швидкістю; 3 – гальмування корпусу виробу зі сталою швидкістю.

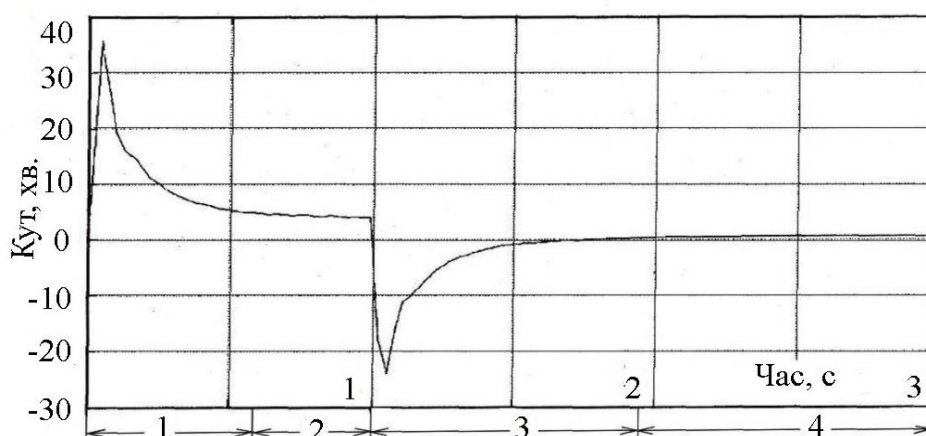


Рис. 4.43. Зміна кутового положення БО при русі виробу по пересіченій місцевості (дискретність 1,7 мс, смуга пропускання ДУС 100 Гц)

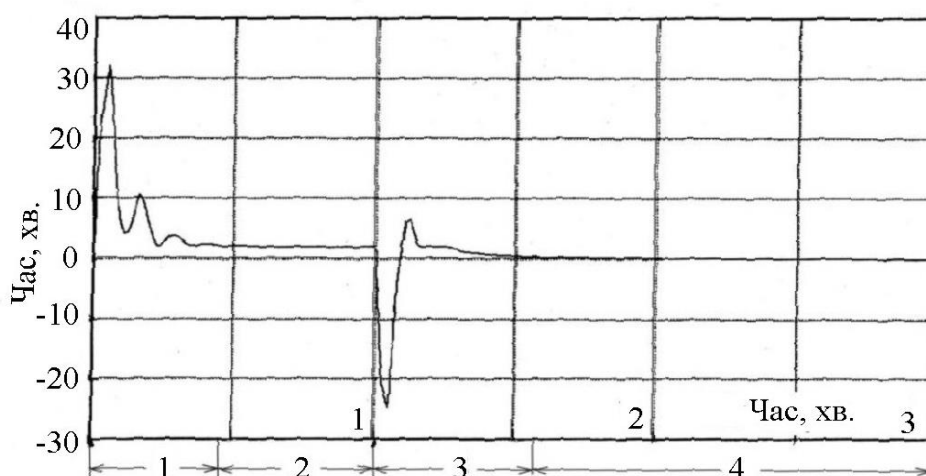


Рис. 4.44. Зміна кутового положення БО при русі виробу по пересіченій місцевості (дискретність 1,0 мс, смуга пропускання ДУС 100 Гц)

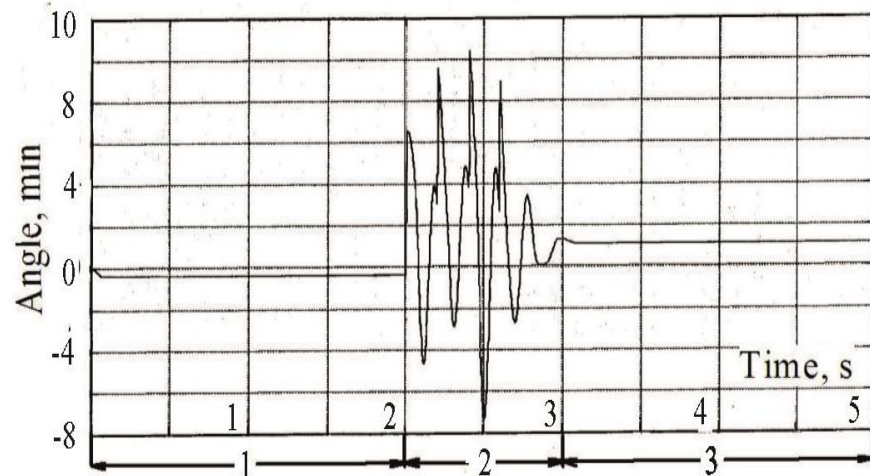


Рис. 4.45. Відпрацювання послідовності імпульсів при дискретності:
1,7 мс для ДКШ зі смугою пропускання 100 Гц

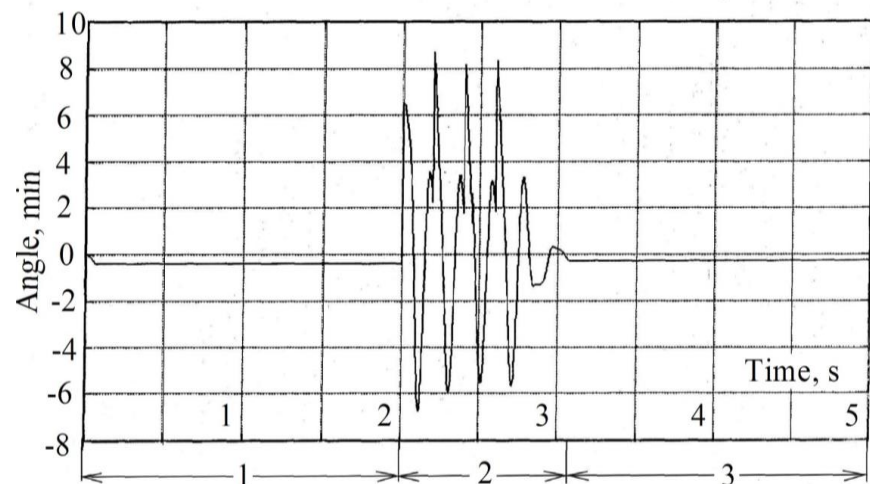


Рис. 4.46. Відпрацювання послідовності імпульсів при дискретності:
1,0 мс для ДКШ зі смугою пропускання 100 Гц

На рис. 4.45 та 4.46 наведені результати моделювання, що відповідають зміні кутового положення БО при відпрацюванні послідовності імпульсів: де, 1 – кутове положення БО до подачі імпульсів; 2 – кутове положення БО при подачі імпульсів; 3 – кутове положення БО після подачі імпульсів.

За результатами дослідження впливу ширини смуги пропускання та частоти інформаційного обміну встановлено, що формування вихідних сигналів має бути не менш 1000 Гц, а смуга пропускання – не менш 100 Гц.

4.4. Вибір методу оцінки динамічної похибки стабілізації

Метою досліджень є вибір методу визначення динамічної похибки стабілізатора [19, 20], який:

- дає при моделюванні значення динамічної похибки стабілізації, близькі до зазначеного вище значення (2 т. д.) для 2Е52 [21];
- використовує обчислювальні потужності блоку керування (БУ);
- визначається з пульта керування (ПУ) стабілізатора без введення персонального комп'ютера на робоче місце оператора.

Дослідження було побудовано на вертикальному каналі стабілізатора, який є більш наражений до дій зовнішніх впливів.

При експериментальних дослідженнях, які проводились методом математичного моделювання, будуть розглянуті три наступні методи визначення динамічної похибки:

Метод 1: Подача синусоїдального сигналу в блоці управління в точку «збиття» (рис. 4.47 після інтегратора) та визначення амплітуди поточного значення амплітуди 2 виходу інтегратора та синусоїдального сигналу 1, що задається (рис. 4.48), з урахуванням фазового запізнення.

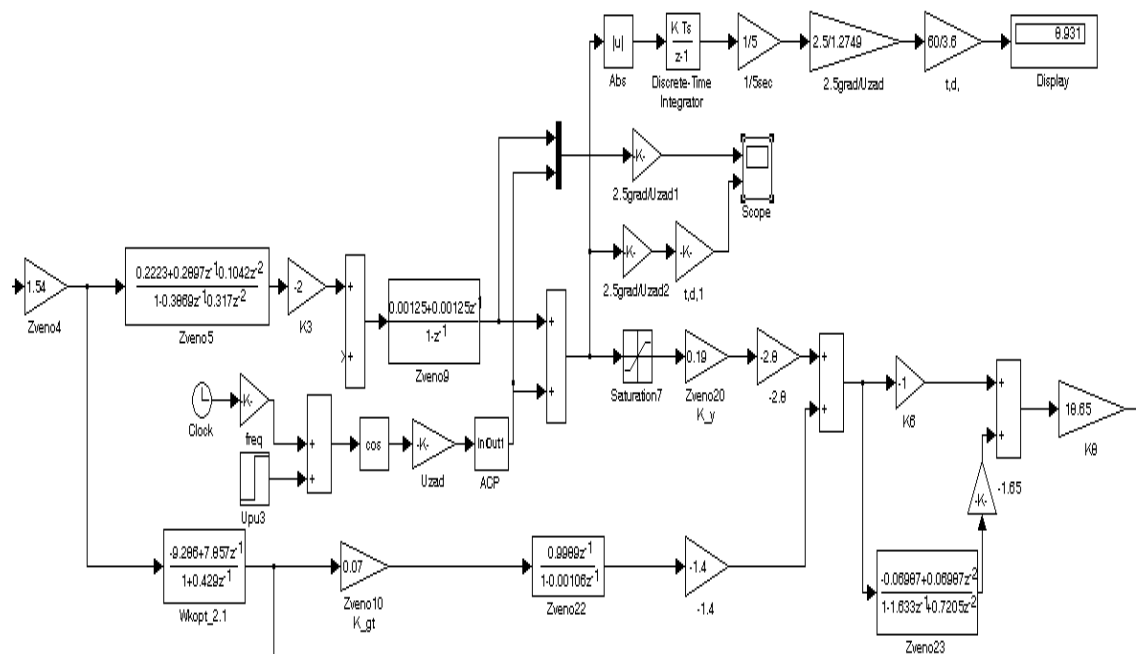


Рис. 4.47. Схема блока управління для визначення динамічної похибки у точці «збиття» при частоті обчислення 400 Гц та ГТ46 як ДКШ

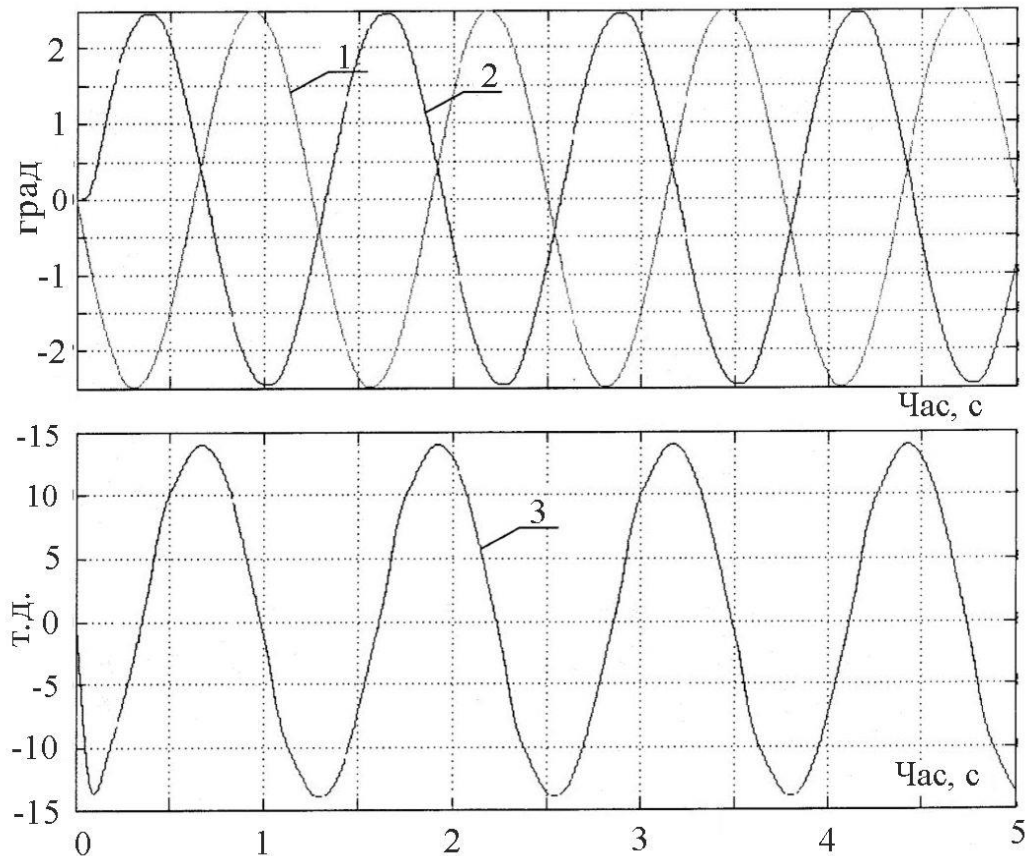


Рис. 4.48. Сигнали у точці «збиття» блоку управління: 1 - задаваний (град.), 2 - після інтегратору (град.), 3 - сумарний (т. д.) при частоті обчислення 400 Гц та ГТ46 як ДКШ

Метод 2: Подача синусоїдального сигналу у блок управління у точку «збиття», як у методі 1 (рис. 4.47), та визначення різниці максимальних значень амплітуд сигналу 2 $U_{\text{ІНТ}}$ (В) після інтегратора та сигналу, що задається 1 $U_{\text{ЗАД}}$ (В) (рис. 4.49). Різниця амплітуд ($U_{\text{ЗАД}} - U_{\text{ІНТ}}$) поділена на сигнал, що задається у точці «збиття» $U_{\text{ЗАД}}$ 1, дає відносне значення динамічної похибки за методом 2. Для переходу до абсолютного значення динамічної похибки в кутових одиницях необхідно помножити відносне значення на амплітуду коливань блоку озброєння, що задаються $A_{\text{ЗАД}} = 2,5$ град, а потім перевести у т. д.:

$$\delta_2 = \left(\frac{60}{3,6} \right) 2,5 |U_{\text{ЗАД}} - U_{\text{ІНТ}}| / U_{\text{ЗАД}} \quad (4.9)$$

У теорії інформаційних систем [22] вищевказана похибка називається динамічною частотною похибкою. Ще можна вважати таку похибку похибкою

коефіцієнта перетворення. Вираз (4.9) дозволяє також будувати амплітудно-частотні характеристики стабілізатора.

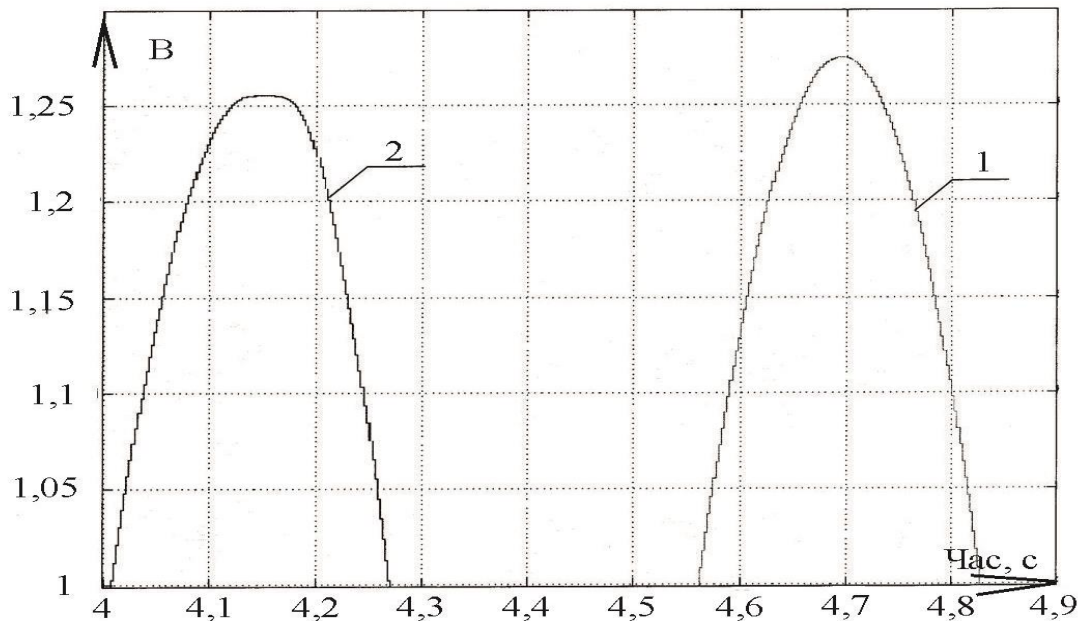


Рис. 4.49. Порівняння амплітуд сигналів у точці «збиття»: 1 – задаваний (В), 2 - після інтегратору (В) при частоті обчислення 400 Гц та ГТ46 як ДКШ

Метод 3: Подача синусоїдального сигналу до блоку управління в точку після оцифровки вихідного сигналу датчика кутової швидкості (рис. 4.50) з подальшим інтегруванням сумарного сигналу (рис. 4.51) з виходу датчика кутової швидкості 2 (ГТ або КВГ) та сигналу, що задається 1, для отримання похибки 3 в значеннях кута відхилення блоку озброєння.

Метод дослідження динаміки системи управління за сигналом кутової швидкості можна використовувати відповідно до наступного: по-перше, основною задачею стабілізації є забезпечення мінімальної кутової швидкості стабілізованої платформи [22]; по-друге, побудову частотних характеристик розімкнутих систем управління в деякому діапазоні частот квазистатичного руху (від частот 0,1 Гц) до роботи у режимі граничних прискорень (до частот $E_{\max} / \omega_{\max} = 2 \frac{1}{c}$), де, $E_{\max} = 60$ град/сек² – граничне прискорення, $\omega_{\max} = 35$ °/с – максимальна швидкість БО) виконують при заданій кутовій швидкості [22].

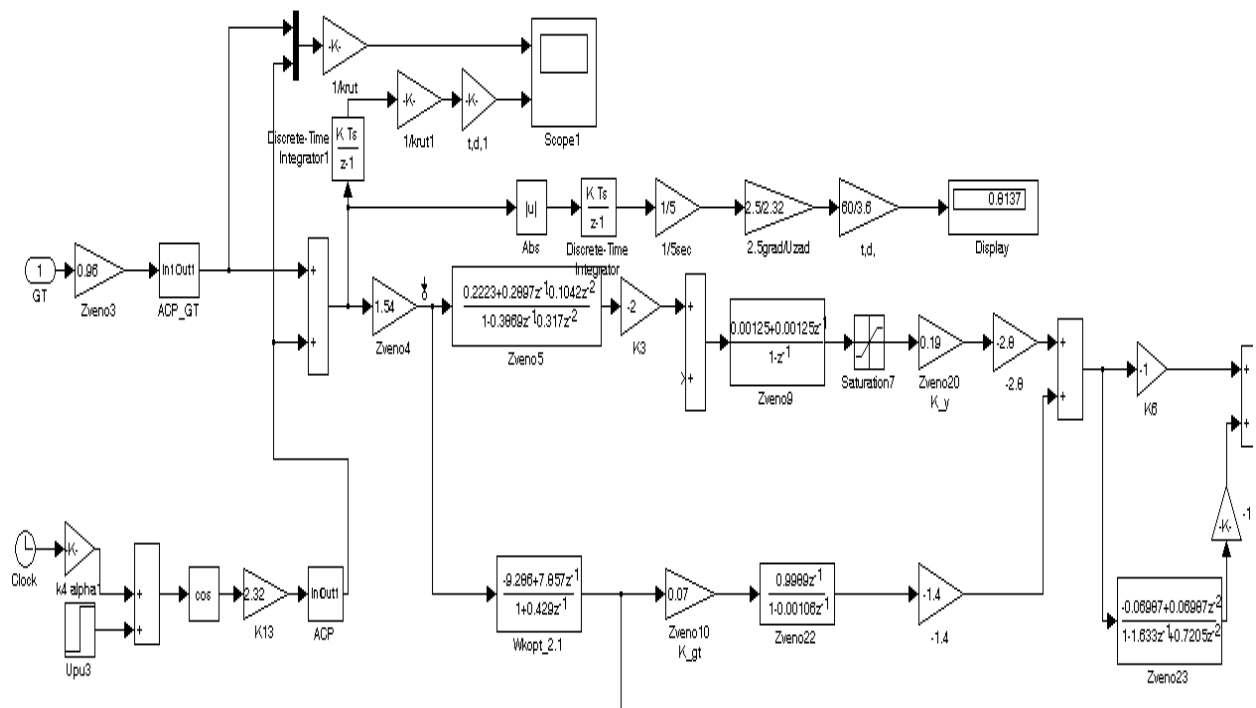


Рис. 4.50. Схема блоку управління для визначення динамічної похибки у точці оцифровки сигналу ДГШ ГТ46 при частоті обчислення 400 Гц

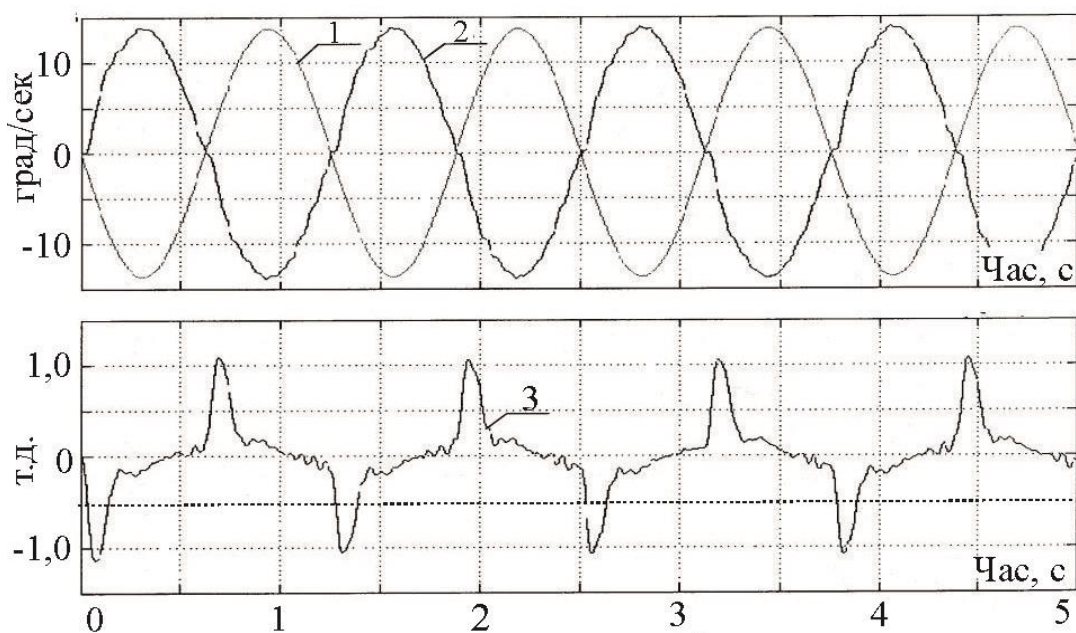


Рис. 4.51. Сигнали блоку управління у точці оцифровки сигналу ДКШ: 1 – такий, що задається (град/сек), 2 - після ДКШ (град/сек), 3 - інтеграл сумарного сигналу (т. д.) при частоті обчислення 400 Гц та ГТ46 як ДКШ

У всіх методах сигнали приводяться через крутість ДКШ $K\omega=0,17$ В/град·сек або відносну форму до вхідних впливів: куту у градусах та кутовій швидкості у град/сек.

Визначення динамічної похибки проводилося по вертикальному каналу при частоті 0,8 Гц амплітудою 2,5 градуси.

При моделюванні за схемами, що наведені на рисунках (рис. 4.47 та рис. 4.50) на блоках «Display» представлені у цифровому вигляді результати моделювання та інші результати, які важливі для аналізу вказаних методів визначення динамічної похибки. Ці результати усереднені інтегруванням по модулю за час виміру та діленням на цей час інтегрування значення:

- сумарного кута у точці «збиття», отриманого за методом 1 (рис. 4.47);
- приведеної до амплітуди кутових коливань, що задаються (2,5 град) сумарної кутової швидкості, отриманої за методом 3 (рис. 4.50).

Перед подачею сигналу, що задається, у точку «збиття» за методами 1 та 2 проводилась попередня калібровка його амплітуди при постійному впливі. Для цього у точку «збиття» подавався стрибок амплітуди напруги, при якому зміна кута моделі блоку озброєння складала 2,5 град. Необхідна величина амплітуди стрибка напруги визначалась шляхом перебору декількох значень. Значення амплітуди заданого сигналу представлені для кожної моделі.

Для досліджень взято три типи стабілізаторів:

- з гіротахометром ГТ46 як датчика кутової швидкості та частотою обчислення цифрового блоку управління 400 Гц;
- з КВГ як датчика кутової швидкості та частотою обчислення цифрового блоку управління 400 Гц;
- з частотою обчислення цифрового блоку управління 1000 Гц та КВГ як датчик кутової швидкості.

Результати моделювання таких стабілізаторів додатково зможуть показати, які характеристики первинного вимірювача кутової швидкості дозволять підвищити точність стабілізації та показати, наскільки покращиться динаміка стабілізатора при збільшенні частоти обчислення цифрового блоку управління.

4.4.1. Результати моделювання

Визначення динамічної похибки вертикального каналу для варіанта побудови стабілізатора із частотою дискредитації 400 Гц та ГТ - 46 як вимірювача кутової швидкості.

Для визначення динамічної похибки за першими двома методами проводиться калібрування сигналу, що задається, у точці «збивання» (рис. 4.47). Поворот блоку озброєння по вертикальному каналу на кут $\text{Азад}=2,5$ град. (рис. 4.52) забезпечується подачею в точку «збиття» блоку управління напруги амплітудою $U_{\text{зад } 1} = 1,2749$ В.

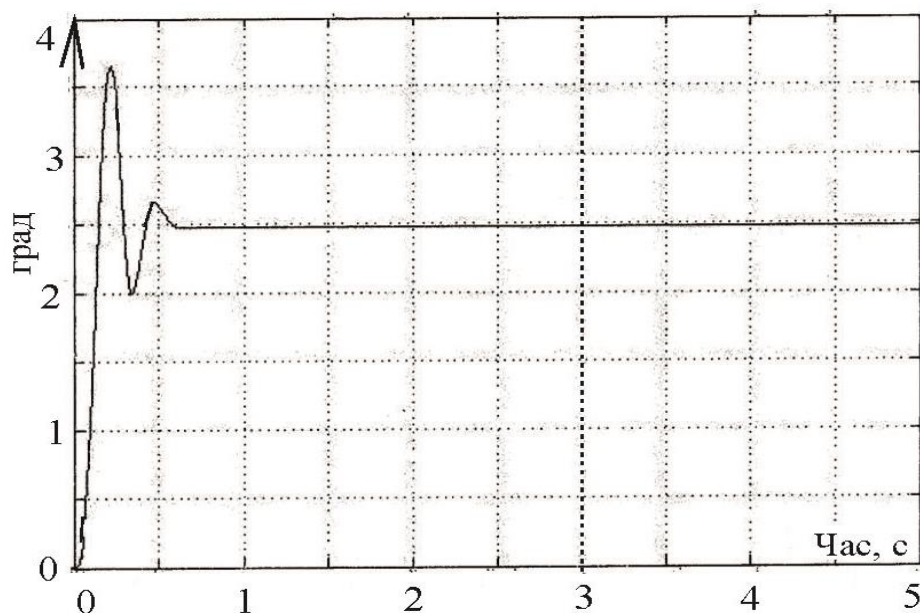


Рис. 4.52. Відпрацювання стабілізатором стрибкоподібної напруги у точці «збиття»

Заданий сигнал з такою амплітудою напруги $U_{\text{Зад } 1}=1,2749$ В (рис. 4.49) та частотою $f=0,8$ Гц подається у точку «збивання». Одержано величину динамічної похибки за методом 1: $\delta_1 = 14$ т. д. (рис. 4.48) . Усереднене значення такої похибки протягом 5 секунд (див. «Display» на рис. 1) складе $\delta_{1\text{CP}} = 8,9$ т. д. (рис. 4.47).

Амплітуда вихідного сигналу інтегратора склала $U_{\text{ІНТ}} = 1,255 \text{ В}$ (рис. 4.49). При амплітуді сигналу, що задається, $U_{\text{ЗАД}} = 1,2749 \text{ В}$ по формулі (4.9), одержано динамічну помилку стабілізації за методом 2:

$$\delta_2 = \frac{(60/3,6)2,5|1,255-1,2749|}{1,2749} = 0,0436 \text{ т.д.} \quad (4.10)$$

Максимальне значення інтеграла сумарного сигналу (заданого $\Omega_{\text{ЗАД}} 2$ та виходу ДКШ $\Omega_{\text{ДКШ}} 1$, див. рис. 4.51) у точці після оцифровки сигналу ДКШ дає значення максимального відхилення блоку озброєння (3 див. рис. 4.51) від заданого при гармонічному впливі, тобто динамічну помилку стабілізації за методом 3: $\delta_3 = 1,15 \text{ т. д.}$ При цьому, осереднена помилка кутової швидкості, що відпрацьовується, приведена до амплітуди кутових коливань, що задаються (2,5 град.), складе (див. «Display» на рис. 4.50) $\delta_{\text{ЗСР}} = 0,81 \text{ т. д.}$

Попереднє калібрування теж потрібно проводити в такому випадку, якщо крутість ДКШ не буде відповідати заданому значенню. При цьому, калібрування здійснюється шляхом завдання постійної напруги величиною $U_{\text{ЗАДЗ}} = 1,7 \text{ В}$ у точку після оцифровки сигналу ДКШ та визначенням часу t проходження блоком озброєння деякого значення кута ($\alpha = 90 \text{ град.}$ або 30 град.). Подальше перерахування крутості за формулою $K_{\omega\text{ОЦ}} = U_{\text{ЗАД}}(\alpha / t)$ продемонструє, наскільки крутість $K_{\omega\text{ОЦ}}$ відповідає заданій K_{Ω} , і які вносити зміни в блок керування для виставки заданій крутості ДКШ. При моделюванні, замість крутості, можна здійснити добір напруги гармонійного сигналу, що задається, $U_{\text{ЗАД1}}$ таким чином, щоб амплітуда коливань блоку озброєння склала 2,5 град.

При моделюванні амплітуда гармонійного сигналу, яка забезпечує амплітуду коливань блоку озброєння в 2,5 град. відповідала $U_{\text{ЗАД4}} = 2,32 \text{ В}$, що відрізняється від $U_{\text{ЗАД2}} = 2,125 \text{ В}$, отриманої раніше розрахунковим шляхом. Причиною тому є введення по ланцюгах контуру блоку керування певних оптимізаційних коефіцієнтів у ланці 3 $K_3 = 0,96$ та ланці $K_4 = 1,54$ (рис. 4.50) на шляху сигналу ДКШ до інтегруючої, та демпфіруючим ланцюгам.

Результати моделювання узагальнені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Результати моделювання динамічної похибки вертикального каналу
стабілізатора

Параметри стабілізатора	U _{зад1} , В	δ_1 , т.д.	δ_{1CP} , т. д.	U _{інт} , В	δ_2 , т.д..	U _{зад4} , В	δ_3 , т.д.	δ_{3CP} , т.д.
ДКШ ГТ46, час обчислен- ня 400 Гц	1,275	14	8,9	1,255	0,5	2,32	1,15	0,81
ДКШ КВГ, час обчислення 400 Гц	1,262	14	8,9	1,24	0,58	2,3	1,15	0,8
ДКШ КВГ, час обчис - лення 1000 Гц	1,263	15	8,9	1,255	1,016	2,3	1,5	1,35

За допомогою математичного моделювання отримані наступні результати:

1. Динамічна похибка в точці «збиття» з урахуванням фазового запізнювання (метод 1) дає значення, що завжди перевищують 2 т.д;
2. Найменше значення динамічної похибки (0,015 т.д.) отримано при визначенні її за різницями амплітуд сигналів у точці «збиття» (метод 2).
3. Динамічна похибка при подачі сигналу до блоку управління в точку після оцифровки виходу датчика кутової швидкості (метод 3) склала 1,15 т.д.

За результатами робіт визначено, що найменше значення динамічної похибки до заявленої у технічній документації на 2Е52 (≤ 2 т. д.) було досягнуто при подачі синусоїдального сигналу в точку після виходу датчика кутової швидкості (метод 2).

Висновки до розділу 4

1. В результаті експериментальних досліджень встановлено:
 - електромагнітні постійні часу становлять (за результатами вимірів):
 - 0,7 мс – для ЕДМ20М,

- 0,7 мс – для ЕДМ02.
- 0,85 мс – для ЕДМ20;
- електромеханічні постійні часу становлять:
 - 20 мс – для ЕДМ20М,
 - 24 мс – для ЕДМ02,
 - 26 мс – для ЕДМ20.

2. Смуга пропускання ГТ46 для різних варіантів передатних функцій знаходиться у діапазоні 31-36 Гц . Найбільша смуга пропускання для гіротахометра з передатною функцією (варіант 1):

$$W_1(p) = \frac{11,04}{1 + 0,003724p + 4,21 \cdot 10^{-5} \cdot p^2}.$$

3. Математичним моделюванням визначено, що підвищення точностних характеристик може бути досягнуто за рахунок зменшення дискретності обробки цифровим обчислювачем блоку управління до 1, 0 мс та полосою пропускання не менше 100 Гц.

4. Порівняння похибок стабілізації у вертикальному каналі при дискреті обчислення 1,7 мс та 1,0 мс показало, що при тривалості дискрету обчислення 1,0 мс погрішність, що встановилася при розгоні й русі виробу з постійною швидкістю, у порівнянні з результатами при дискретності 1,7 мс - у два рази менше, а після впливу імпульсних збурювань блок озброєння при дискреті 1,0 мс повертається у вихідне положення з погрішністю, що не перевищує 0,1 угл. хв.

5. Динамічна похибка в точці «збивки» з урахуванням фазового запізнювання (метод 1) дає значення, що завжди перевищують 2 т. д;

6. Найменше значення динамічної похибки (0,015 т. д.) отримано при визначенні її за різницями амплітуд сигналів у точці «збивки» (метод 2).

7. Динамічна похибка при подачі сигналу до блоку управління в точку після оцифровки виходу датчика кутової швидкості (метод 3) склала 1,15 т.д.

За результатами робіт визначено, що найменше значення динамічної похибки до заявленої у технічній документації на 2Е52 (≤ 2 т. д.) було досягнуто

при подачі синусоїдального сигналу в точку після виходу датчика кутової швидкості (метод 2).

Список літератури до розділу 4

1. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая/Л. : Энергоатом. –1990. – С. 288.
2. Величко Т.И., Родькин Д.И. Теория электропривода. Часть 1.Механика и характеристики двигателей / Т.И. Величко, Д.И. Родькин // КГПИ, Кременчуг. – 1999. – С. 237.
3. Кардонов Г.А. Курс лекций по электроприводу [Электронный ресурс] / Г.А. Кардонов // Государственный институт точной механики и оптики, Санкт – Петербург. – 2003. – Режим доступа: ets.ifmo.ru/kardonov/privod/privod.htm.
4. Донбасский государственный технический университет / УЧЕБ_ПОСОБИЕ_часть_2 / редак / 5-6 МЕХАНИЧ_ПП-измен_A5.doc <https://studfile.net/preview/5060890/page:2/>
5. Московский государственный открытый университет им. В. С. Черномырдина. Электрический привод / Главы по ЭП / 10_Глава 8.doc <https://studfile.net/preview/2263789/page:3/>
6. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов / Наука. – Москва. – 1975г. – С. 768.
7. Головкин Д. В. Метрологія та основи вимірювань / Д. В. Головкин, К. Г. Рого, Ю. О. Скрипник // Либідь. – Київ. – 2001. – С. 408.
8. Одинцов А.А. Теория и расчет гироскопических приборов / А.А. Одинцов // Учебное пособие., Высшая школа., Главное издательство. – Киев. – 1985. – С. 392.
9. Александрова А.Д. Индикаторные гироскопические платформы / А.Д. Александров, Е.А. Правоторов, В.Ф. Рафельсон, М.П. Фельдман // Машиностроение. – 1979. – С. 239.

10. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння [текст]: монографія / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасников, В.В. Чіковані // ЖДТУ. – Київ. – 2014. – С. 176.
11. Гиротахometri GT46-01. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html>.
12. КВГ, ЦКВГ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zelaz.ru/koriolisovyy-vibracionnyy-giroskop-kvg-ckvg.htm>.
13. G20 to axis MEMS rate gyro. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.gladiatorotechnologies.com>.
14. Nasiri S. A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and CommercializationStatus. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.invensense.com/shared/pdf/MemsGyroComp.pdf>
15. Волоконные датчики вращения ВГ***. Сводные ТУ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.
16. Техническое описание боевой машины пехоты БМП-3. Москва, Воениздат. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://eknigi.org/voennaja-istorija/181170-bmp3-tehnicheskoe-opisanie-boevoy-mashiny-pehoty.html/>
17. Васильев В.В. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK / В.В. Васильев, Л.А. Симак, А.М. Рыбникова // Учебное пособие. К.: НАН Украины. – 2008. – С. 91.
18. Ashish Tewari Modern Control Design. With MATLAB and SIMULINK. Indian Institute of Technology, Kanpur, India. John Wiley & Sons Ltd Baffins Lane, Chichester, West Sussex, PO19 1UD, England. P-503.
19. Лазарева Т. Я. Основы теории автоматического управления / Т.Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов // Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – С. 352.
20. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации / В.А. Бесекерский, Е.А. Фабрикант // Судостроитель, Л. – 1968. – С. 348.
21. Березин С.М. Комплекс вооружения БМП-3 / С.М. Березин,

В.П. Конончук, А.П. Луньков, А.И. Никонов // Вестник бронетанковой техники. – № 5. – 1991.

22. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский // Вища школа. – Киев. – 1983. – С. 455.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ СТАБІЛІЗАЦІЇ

Основою для практичного визначення похибки стабілізації була методика вимірювання срединної похибки аналогових двохплощинних стабілізаторів 2Е36, яка була розроблена в 80-х роках минулого сторіччя [1]. Ця срединна похибка повинна була не перевищувати ± 1 т. д. (1 тисячна дистанції = 3,6 кут. хв.) [2] у кожній із площин наведення: горизонтальній (ГН) або вертикальній (ВН). Перевірка срединної похибки проводилася у складі виробу замовника на типовій трасі [3] при періодичних випробуваннях на 2-х стабілізаторах серійного виготовлення раз на рік.

5.1. Аналіз літературних даних та постановка задачі

З початку створення вітчизняних аналогових та цифрових стабілізаторів перевірка похибки стабілізації проводилась за методом та в строки аналогічні стабілізаторам 2Е36. Інших перевірок точності стабілізації не було.

З іншої сторони, необхідно врахувати, що сучасні мобільні об'єкти рухаються зі значними швидкостями, на них діють відчутні перевантаження та неконтрольовані механічні збурення. Тому, вимоги до вимірювання точності, засобів вимірювання, контролю основних технічних параметрів стабілізаторів є особливо актуальними, оскільки вони стосуються безпеки держави.

У роботі [1] наведені матеріали щодо вимірювання срединної похибки стабілізації аналогових стабілізаторів 2Е36 та стабілізаторів, що мають аналогічну модель побудови, методом кінографування. Показано, що цей процес проводиться тільки у складі основного виробу [2], в умовах типової траси. Дана методика обробки результатів, що доволі трудомістка, рутинна та займає багато часу на обчислення похибки в ручному режимі.

Зрозуміло, що метод кінографування на час його розробки, а це середина 80-х років минулого сторіччя, був прогресивний та проводився за допомогою

кінокамери, що закріплювалась на стабілізованій (у двох площинах) частині виробу. Кінокамера фіксувала переміщення стабілізованої частини виробу по каналах горизонтального та вертикального наведення при русі виробу по типовій трасі.

До недоліків цього методу можна віднести і те, що випробування проводились лише на двох комплектах стабілізатора раз у рік під час проведення типових випробувань. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, що пов'язані з трудомісткістю випробувань. Для зменшення трудомісткості допускалося застосування приладу (Прилад ПС) з комплекту стабілізатора 2Е26М [3]. Прилад ПС – це електронний вимірювальний пристрій, що призначений для визначення величини середньої похибки та проценту часу нестабілізованого стану виробу стабілізатора 2Е26М у площинах ВН та ГН.

Прилад отримував з блоку управління стабілізатором інформацію від датчиків кута по каналах вертикального та горизонтального наведення та порівнював ці значення із значеннями, які не перевищували відповідні допустимі норми для даної типової траси (п. 1.5 розділ 1). Застосування цього приладу значно полегшило вимірювання середньої похибки.

Подолання труднощів вимірювання похибки стабілізації знайшло свою реалізацію у стабілізаторі 2Е52 [4-6], що був розроблений з новими технічними характеристиками. В документації на стабілізатор 2Е52 були встановлені вимоги до перевірки середньої та динамічної похибки [5] (у складі головного виробу) стабілізації, яка не повинна перевищувати 2 т.д. (за даними 1988 року) при відпрацюванні синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$.

Необхідно зауважити, що стабілізатори 2Е36 та 2Е52 мають різні схемо-технічні принципи побудови. Стабілізатор 2Е36 побудовано на принципі «силової» стабілізації, що передбачає наступне:

- оптико-електронний прилад ОЕМ «жорстко» [6] зв'язан з блоками БО та Б;
- наведення блоку БО та Б виконується безпосередньо за допомогою пультів управління стабілізатора. При такому принципі побудови наведення з пульта управління стабілізатором Б та БО доводиться застосовуватися великі моменти

тому, що вони мають значні маси та моменти інерції, що призводить до суттєвих похибок.

У стабілізаторі 2Е52 [6] блоки наведення Б і БО та прилад візування спостереження за об'єктами виконані за принципом «незалежної» стабілізації, а саме, блоки Б та БО не мають жорсткого зв'язку з приладом спостереження за об'єктами. У цьому стабілізаторі, як прилад спостереження за об'єктами, використовується прилад зі стабілізованим полем зору (СПЗ). Принцип дії цього стабілізатора полягає в тому, що наведення поля зору приладу СПЗ виконується за допомогою пультів управління стабілізатора, а наведення Б та БО проводиться за сигналами від датчиків кута приладу СПЗ.

Огляд технічної літератури [7] підтверджує висновки, що структура та необхідні параметри стабілізатора визначаються в кінцевому підсумку заданою точністю роботи. При цьому, критерії оцінки можуть бути різними, але у вимогах щодо точності головна увага приділяється максимальній похибці стабілізації [8]. У більшості випадків визначальним є значення кута стабілізації: максимальне, середнє або середнє квадратичне.

Різні загально-доступні видання [1–10] дають тільки поверхнєве уявлення про факти контролю динамічної похибки стабілізації лише у стабілізаторах, що побудовані за принципом «незалежної» стабілізації.

До невирішених питань можна віднести, по-перше, неможливість перевірки динамічної похибки стабілізації на стабілізаторах, що побудовані за принципом «жорсткої» стабілізації, по-друге, відсутність визначення технічних вимог та методу вимірювання динамічної похибки.

5.2. Мета та завдання дослідження розробки та впровадження методу вимірювання динамічної похибки стабілізації

Метою дослідження є розробка та впровадження методу вимірювання динамічної похибки стабілізації стабілізаторів – одного з основних технічних параметрів. Дане вимірювання буде проводитись на етапі виготовлення стабілізаторів на підприємстві, що їх виробляє, та в головному виробі замовника

без застосування випробувань у польових умовах.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Визначити точку подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора.
2. Визначити значення основних параметрів синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ щодо механічних характеристик атестованного стенду для проведення випробування СТМ02 та учбового комплексу УК675.
3. Визначити параметри подачі сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ у складі технологічного стенду СТМ02 та комплексу УК675.
4. Визначити достатність обчислювальних можливостей блоку управління та пульта управління без введення до робочого місця перевірки персонального комп'ютера.

5.3. Основна частина методу визначення динамічної похибки стабілізації

5.3.1. Початкові вимоги

Для застосування технічних вимог щодо визначення динамічної похибки стабілізації у цифрових стабілізаторах необхідно було розробити технічні вимоги та метод оцінки вказаної похибки стабілізації.

Для виконання цього завдання були проведені аналітичні та експериментальні дослідження щодо визначення:

- 1) місця подачі синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ до стабілізатора;
- 2) параметрів синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ стосовно механічних характеристик стенду СТМ02 (рис. 5. 1, а) та учбового комплексу УК675 (рис. 5.1, б);



а)

б)

Рис. 5.1. Обладнання для проведення випробувань: а) – стенд СТМ02; б) – учбовий комплекс УК675

3) методу подачі сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ у складі технологічного стенду СТМ02 та комплексу УК675;

4) методу обчислення динамічної похибки стабілізації;

5) достатніх обчислювальних потужностей блоку управління або пульта управління без введення до робочого місця перевірки персонального комп'ютера.

5.3.2. Визначення точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора

Дослідження по визначенню точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора розглянуто у п 4.4 розділ 4. Виконання досліджень проводились методом математичного моделювання. Для визначення точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора було запропоновано три методи.

За результатами робіт визначено, що найменше значення динамічної похибки до заявленої у документації на 2Е52 (≤ 2 т. д.) було досягнуто при подачі синусоїдального сигналу в точку після виходу датчика кутової швидкості (метод 2).

5.3.3. Визначення значень основних параметрів синусоїдального сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$ щодо механічних характеристик стенду СТМ02 та комплексу УК675

За результатами моделювання були проведені експериментальні роботи по відпрацюванню визначення динамічної похибки стабілізаторів СВУ500-4Ц у складі технологічного стенду СТМ02 та УК675.

Динамічна похибка стабілізаторів φ_{\max} визначалась як максимальне значення функції, отриманої інтеграцією значень сталої під дією збурення, та сумарної кутової швидкості (похибки відпрацювання збурюючої кутової швидкості) руху платформи стенду СТМ02 або БО виробу УК 675 (ω_z).

5.3.3.1. Задання збурюючої кутової швидкості ω_z

Для задання ω_z у стабілізаторі СВУ-500-4Ц в БУ1022-04 та ПУ03-05 на час проведення випробувань була додатково до основної програми встановлена технологічна програма алгоритмічного забезпечення ПА351, яка дозволяла в ручному режимі проводити роботи по визначенню динамічної похибки вертикального ДВН або горизонтального ДГН каналів. При натисканні кнопки «ВВІД» на виході ланки 4 ВН (ГН) (перша ланка після аналогового-цифрового перетворювача (АЦП) у тракті проходження сигналів ГТ46) формувалась функція $U_{\omega z} = U_{MBH(ГН)} \cos \omega t$, під дією якої проходили коливання УК675 або платформи СТМ02 частотою 0,8 Гц, амплітудою $2,5^\circ$ за 3,75 с (3 періоди).

При проведенні випробувань досліджено вплив окремих складових функції $U_{\omega z} = U_{MBH(ГН)} \cos \omega t$,

Для визначення параметрів кутової швидкості (ω) було розглянуто три варіанти: $\omega = 5,02 \cdot \frac{1}{c}$; $\omega = 12,55 \cdot \frac{1}{c}$; $\omega = 25,1 \cdot \frac{1}{c}$, що були досліджені по кожній швидкості окремо. За результатами проведених робіт обрано значення кутової швидкості $\omega = 5,02 \cdot \frac{1}{c}$.

Час дії (t) кутової швидкості збурення визначено виходячи з частоти

коливань 0,8 Гц. При цьому, кількість періодів коливань повинна дорівнювати трьом та на час їх дії самовідведення блоку озброєння і башт повинна бути мінімальною, тобто такою, що не впливає на динамічну похибку стабілізації.

Значення U_M підбирались експериментально за переміщенням променя лазера в межах об'єкта спостереження та складали: для УК 675 – $U_{MBH}=1,39$ В, $U_{MГН}=1,46$ В; для СТМ 02 – $U_{MBH}=1,5$ В, $U_{MГН}=1,7$ В.

На рис. 5.2 наведено схему робочого місця для перевірки динамічної похибки стабілізатора СВУ-500-4Ц.

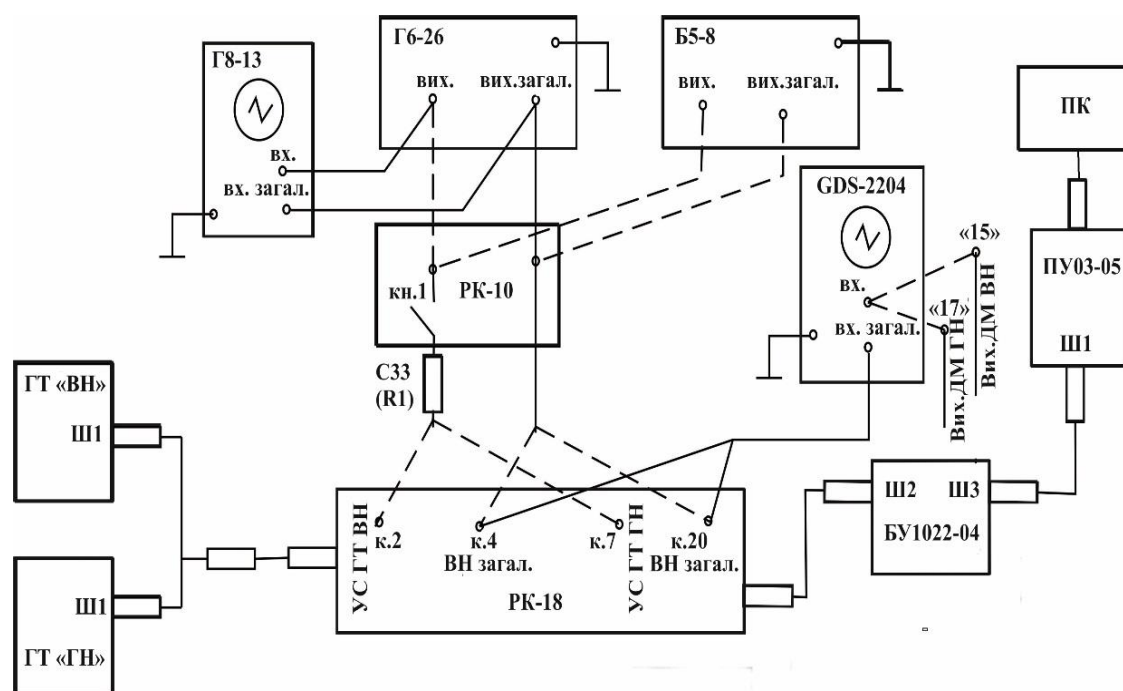


Рис. 5.2. Схема робочого місця для перевірки динамічної похибки стабілізатора: С8-13 – осцилограф; Г6-26 – генератор сигналів; Б5-8 – блок живлення; РК-10 – технологічна коробка; GDS-2204 – осцилограф; ГТ-ВН, ГТ-ГН – датчики кутової швидкості (ДКШ); РК-18 – розподільча коробка; БУ1022-04 – блок управління стабілізатора; ПУ03-05 – пульт управління стабілізатора; ПК – персональний комп'ютер

В результаті проведеної перевірки встановлено, що коливання башти УК675 або платформи СТМ02 проходили під дією функції $U_M \cos 5,02t$ з частотою 0,8 Гц, амплітудою $2,5^\circ$ за 3,75 с (3 періоди).

5.3.3.2. Фіксація сигналів сумарної швидкості ω_{Σ}

Фіксація значень $\omega_{\Sigma BH(\Gamma H)}$ СВУ-500-4Ц проводилась накопиченням масиву значень на виходах демодуляторів відповідних каналів після АЦП (вхід ланки 4), яка передавала його в персональний комп'ютер, підключений до ПУ03-05 та побудовою графіків функцій $U_{\omega\Sigma}$ та $\int_{t=0}^{t=3,75c} U_{\omega\Sigma} dt$.

Ланки проходження сигналу від датчиків кутової швидкості ГТ-ВН та ГТ-ГН, розподільчу коробку РК18, блок управління БУ1022-04, пульт управління ПУ03-05 до персонального комп'ютера ПК можна відстежити на рис.5.2.

5.3.3.3. Розрахунок динамічних похибок

Оскільки,

$$\int_{t=0}^{t=3,75c} U_{\omega\Sigma BH(\Gamma H)} dt = \int_{t=0}^{t=3,75c} K_{\omega} n \omega_{\Sigma BH(\Gamma H)} dt = K_{\omega} \varphi(t), \quad (1)$$

та обравши за графіком функції $\int_{t=0}^{t=3,75c} U_{\omega\Sigma BH(\Gamma H)} dt$ максимальне значення, яке дорівнює $K_{\omega BH(\Gamma H)} \cdot \varphi(t)_{\max BH(\Gamma H)}$, визначається динамічна похибка каналу за формулою:

$$\varphi_{\max BH(\Gamma H)} = \frac{\varphi(t)_{BH(\Gamma H)}}{K_{\omega BH(\Gamma H)}} \times \frac{60}{3,6} \text{ (Т.Д.)} \quad (2)$$

де, φ – кут відхилення осі, що досліджується, від заданого напрямку;

K_{ω} – крутість характеристики тракту проходження сигналів ДКШ

До формули додатково введено коефіцієнт $\frac{60}{3,6}$, що дозволяє отримати значення похибки стабілізації у розмірності т.д.

5.3.3.4. Визначення значення крутості- K_{ω}

Для визначення значення $K_{\omega BH(\Gamma H)}$ СВУ-500-4Ц від джерела постійної напруги С8-13 на к. 2 відносно к. 4 (к.7 відносно к. 20) коробки РК18 (рис. 5.2)

подавався стрибок постійної напруги рівнем $U_{MBH(ГН)}$ та фіксувався час $t_{PBH(ГН)}$ повороту на кут $\alpha_{BH(ГН)}$:

$\alpha_{BH} = 80^\circ$ (від нижнього до верхнього кута обмежувача повороту);

$\alpha_{ГН} = 60^\circ$ (відлік по азимутальному приладу УК675).

Результати експериментального відпрацювання динамічної похибки стабілізатора наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Зведена таблиця результатів експериментальних випробувань динамічної похибки стабілізації

Виріб	Рівень стрибка U_M В	Час виміру t_p , с	Кут повороту α град	$\Omega = \frac{\alpha}{t_p}$, °/с	$K_\omega = \frac{U_M}{\omega}$, Вс/°	Макс. значення інтеграла φ_{max} , Вс	Динамічна похибка, т.д.	№ рис.
Канал ВН								
СВУ-500-4Ц на СТМ02	1,5	3,75	41,6	11,09	0,134	0,0157	1,95	5.4
СВУ-500-4Ц (УК675)	1,39	8,06	80	9,92	0,14	0,0076	0,93	5.6
Канал ГН								
СВУ-500-4Ц на СТМ 02	1,7	3,75	43,9	11,7	0,145	0,021	2,4	5.3
СВУ-500-4Ц на УК675	1,46	6,59	60	9,1	0,160	0,0185	1,93	5.5

Для визначення значень $K_{\omega BH(ГН)}$ СВУ-500-4Ц крутість каналу ВН (КВН), крутість каналу ГН (КГН) при натисканні кнопки «ВВІД» на вихід ланки 4 ВН(ГН) подавався програмно стрибком рівнем $U_{MBH(ГН)}$.

– на СТМ02 – на час 3,75с та фіксувався кут розвороту платформи – $\alpha_{BH(ГН)}$;

– на УК675 фіксувався час розвороту $t_{PBH(ГН)}$ УК675 на кут $\alpha_{BH} = 80^\circ$ або .

$\alpha_{ГН} = 60^\circ$.

Значення крутості K_{ω} вираховувалось у відповідності з виразом:

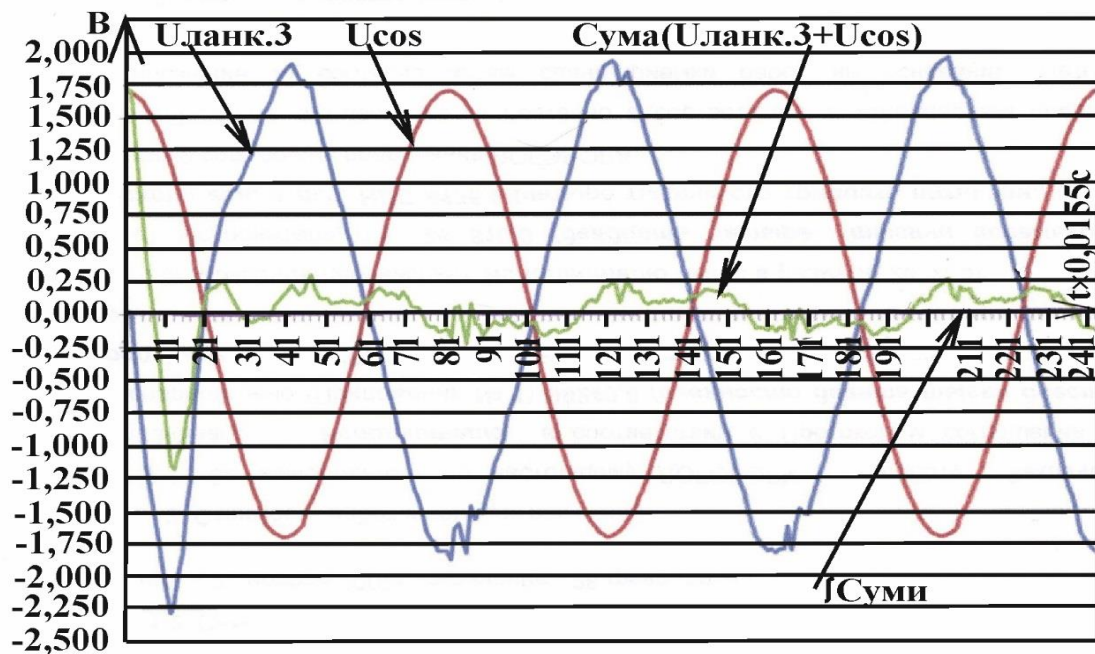
$$K_{\omega_{BH}(\Gamma H)} = \frac{U_{MBH(\Gamma H)}}{\omega_{BH(\Gamma H)}}, \quad (3)$$

$$\text{де, } \omega_{BH(\Gamma H)} = \frac{\alpha_{BH(\Gamma H)}}{t_{pBH(\Gamma H)}}.$$

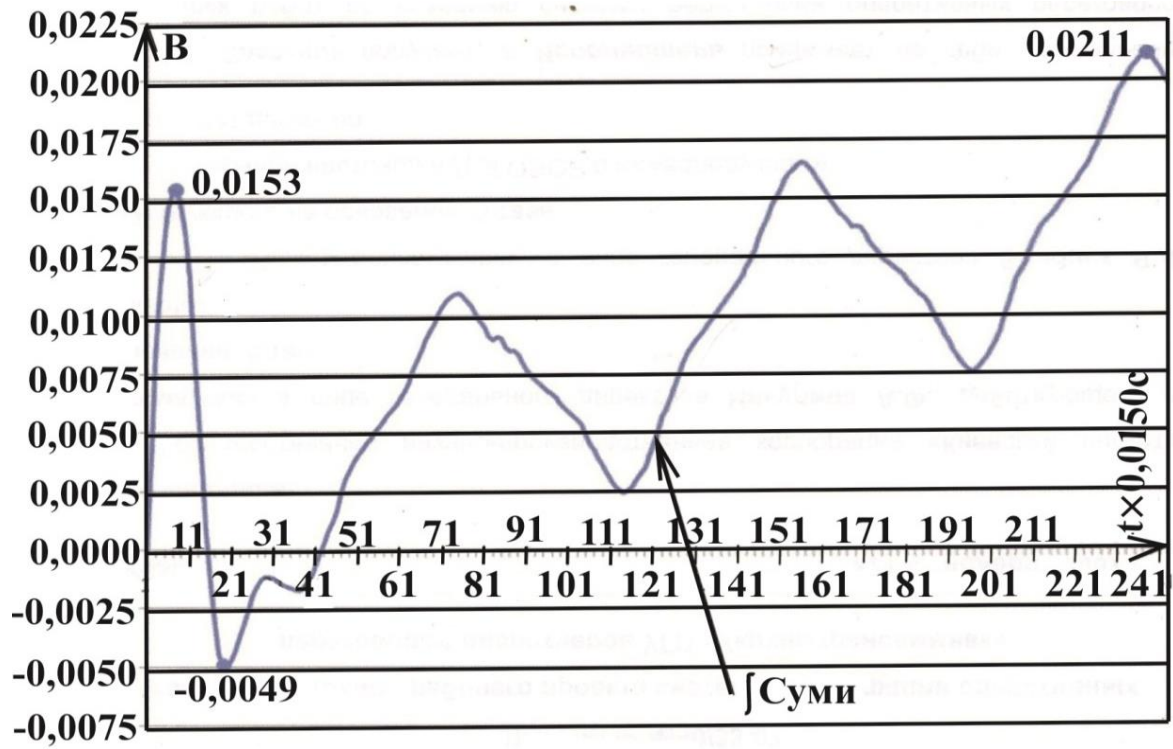
Визначення крутості вихідної характеристики датчиків кутової швидкості необхідно для більш точного розрахунку динамічної похибки стабілізації та повинно проводитись на кожному із комплектів стабілізатора тому, що крутість кожного конкретного датчика кутової швидкості може змінюватись у заданих межах.

5.3.3.5. Результати випробувань щодо відпрацювання динамічної похибки стабілізації

Результати досліджень випробувань наведені у табл. 1 та на рис. 5.3.–5.6.

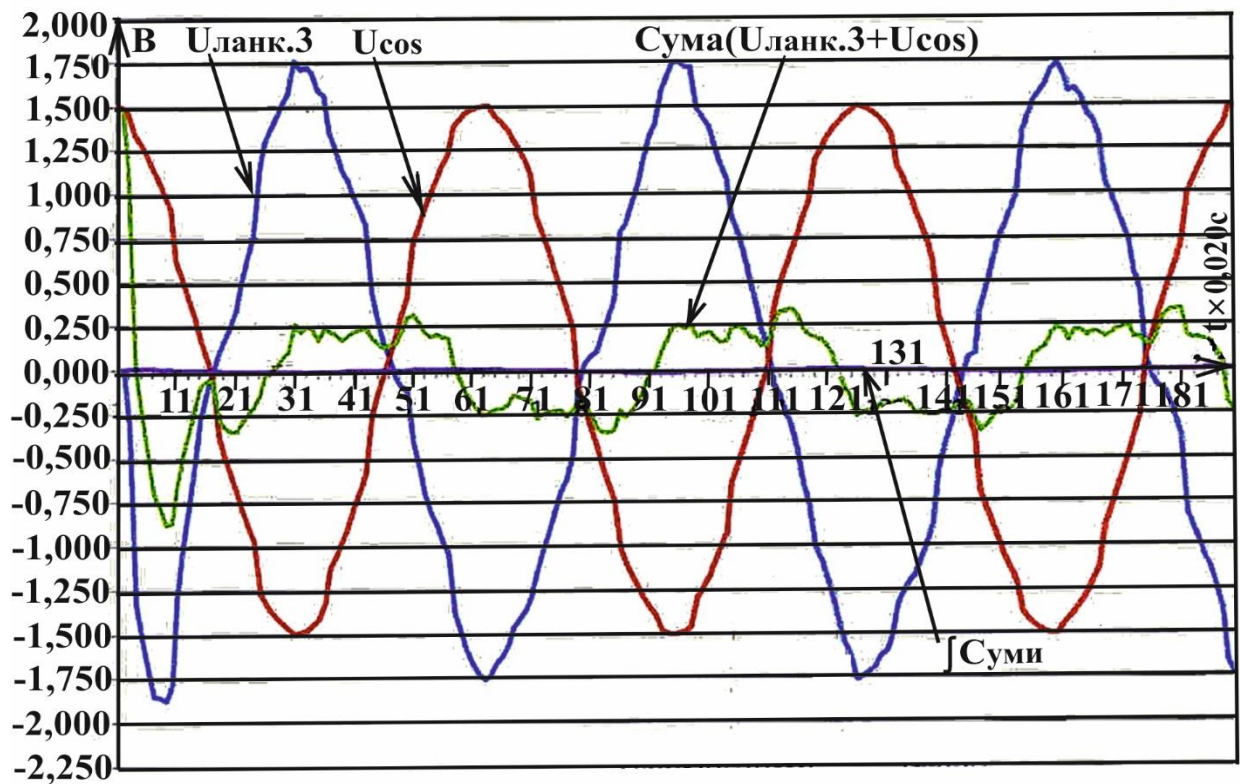


a)

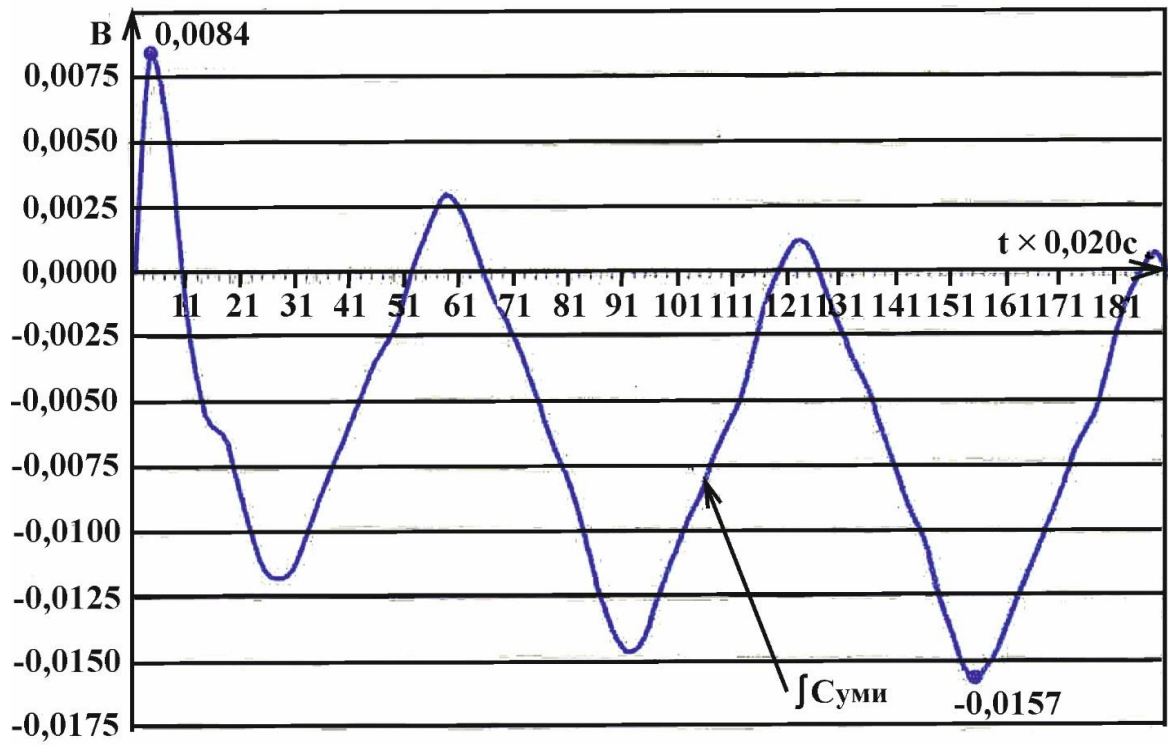


б)

Рис. 5.3. СВУ-500-4Ц на STM02 Канал ГН: а) – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б) – збільшений графік сигналу \int Суми

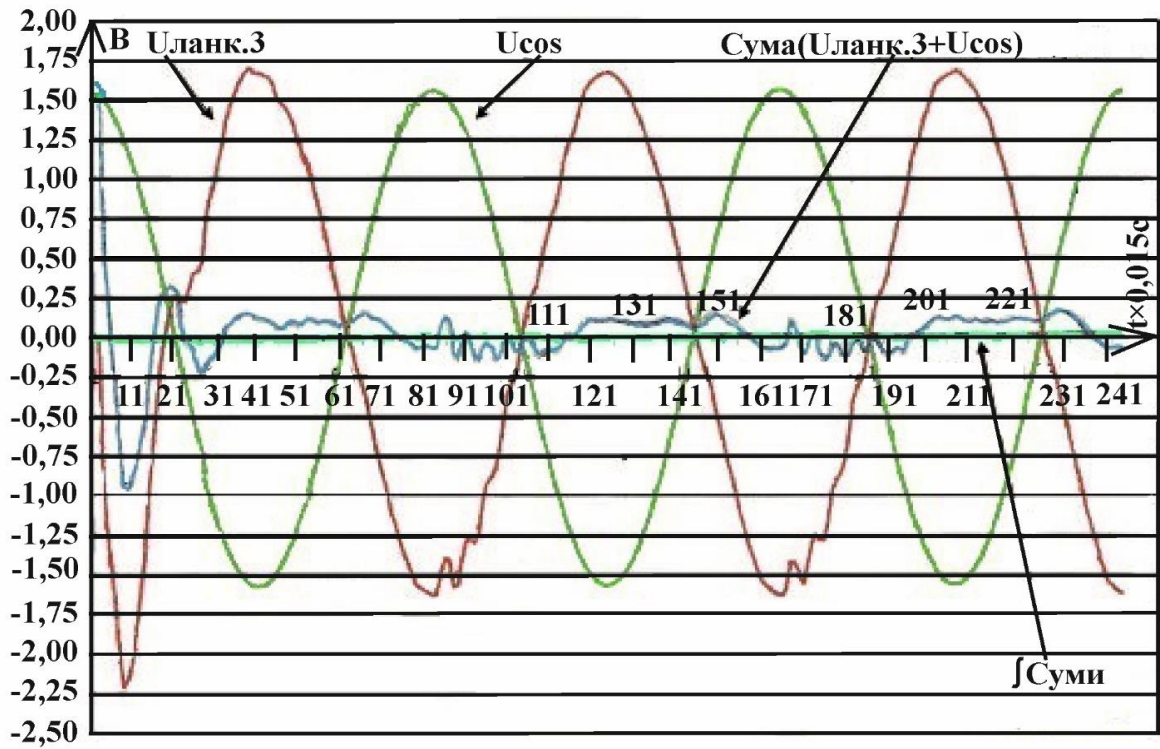


а)

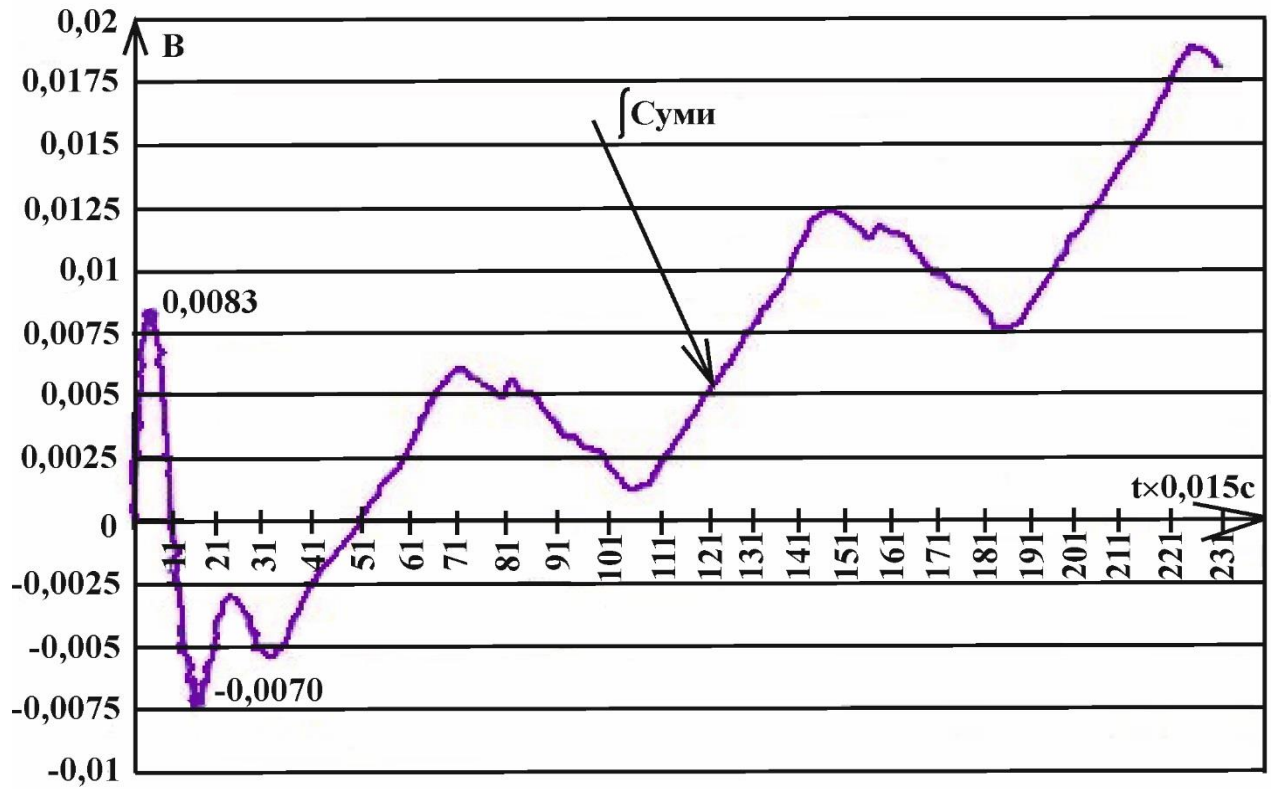


б)

Рис. 5.4. СВУ-500-4Ц на STM02 канал ВН : а) – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б) – збільшений графік сигналу $\int \text{Суми}$

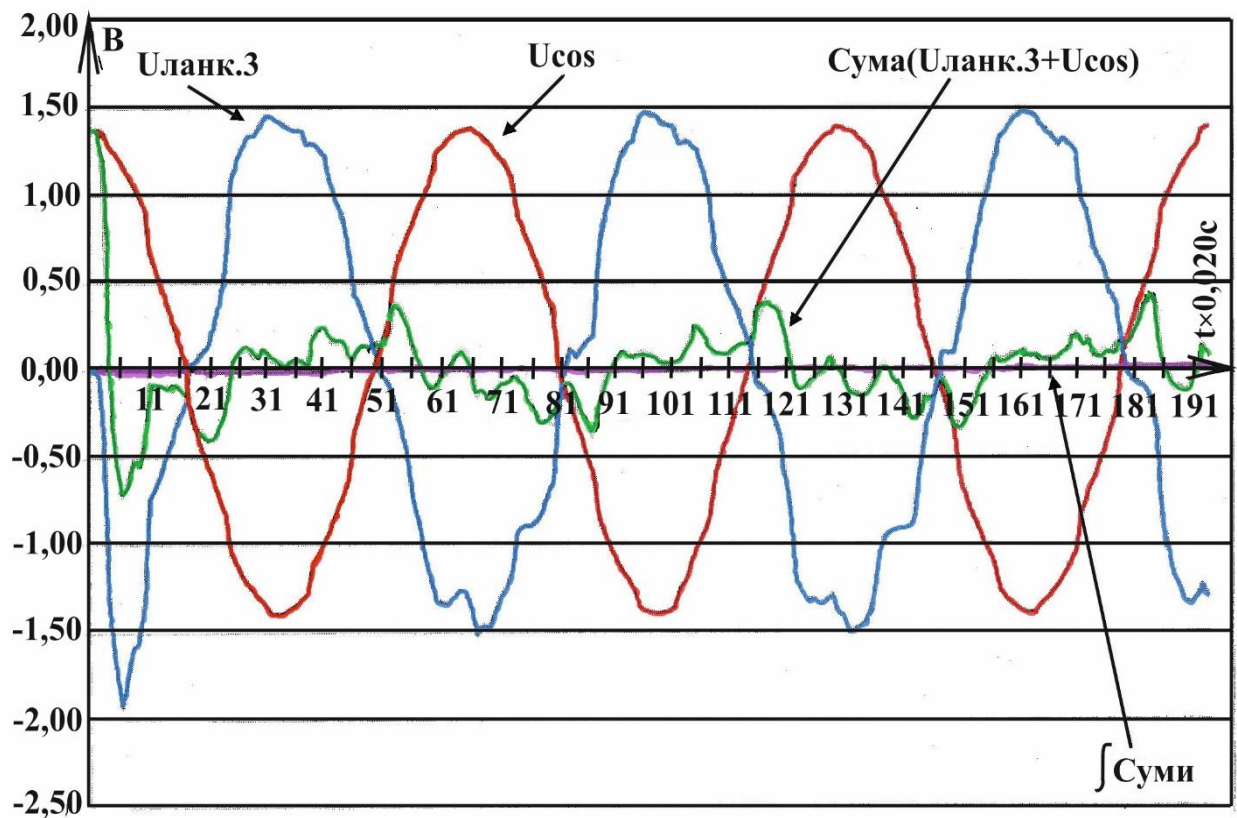


а)

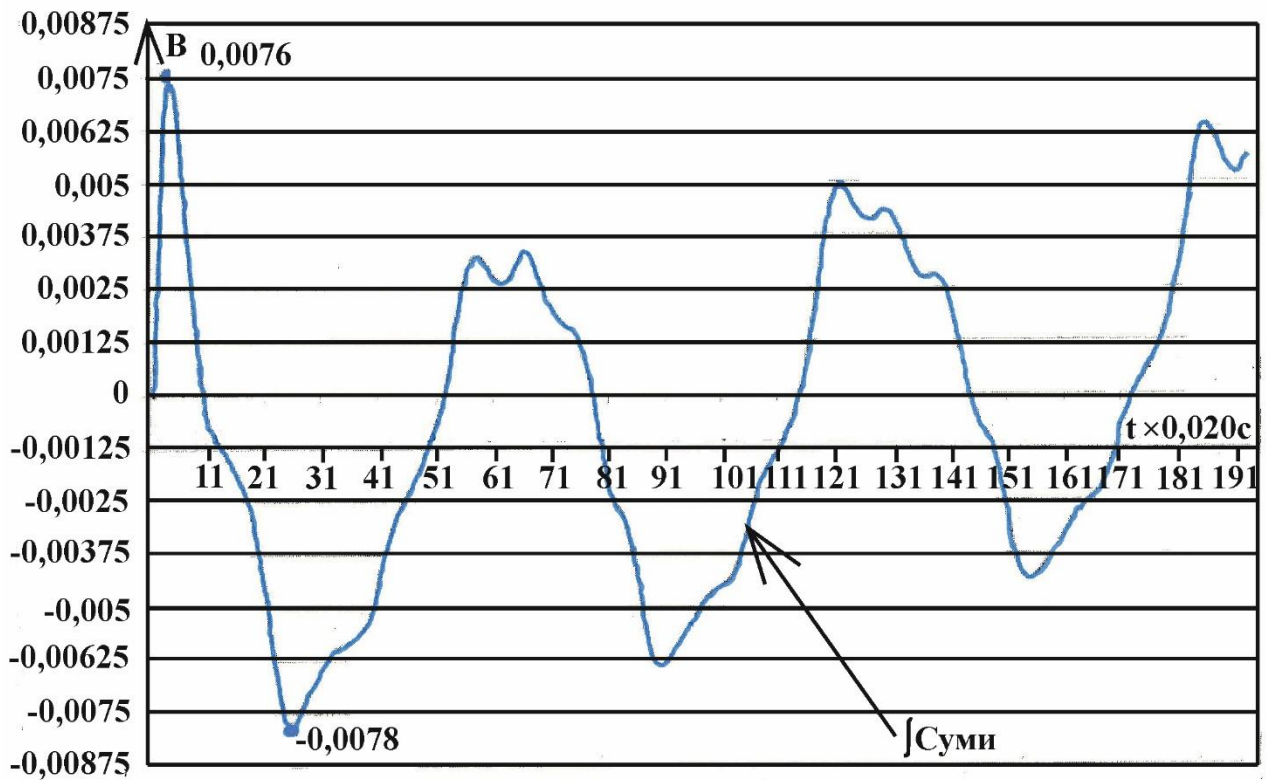


б)

Рис. 5.5. СВУ-500-4Ц на УК675 канал ГН: а) – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б) – збільшений графік сигналу $\int \text{Суми}$



а)



б)

Рис. 5.6. СВУ-500-4Ц на УК675 канал ВН : а) – графіки відпрацювання основних складових для визначення динамічної похибки; б) – збільшений графік сигналу $\int C_{\text{уми}}$

По графіках (рис. 5.3–5.6) наглядно простежується зміна у часі основних сигналів стабілізатора $U_{\text{ЛАНК.З}}$, U_{cos} , $C_{\text{ума}}(U_{\text{ЛАНК.З}} + U_{\text{cos}})$, $\int C_{\text{уми}}$, по обчисленню яких вираховувалась динамічна похибка стабілізації. Для більшої наочності графік $\int C_{\text{уми}}$ наведено у збільшеному масштабі.

Запропонований метод пошуку (п. 5.3.2) точки подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора за допомогою математичного моделювання дозволив вирішити поставлене завдання. Отримані результати повністю погоджуються з результатами вимог щодо вимірювання динамічної похибки (≤ 2 т.д.) стабілізатора 2Е52. Показано, що серед трьох розглянутих методів подачі синусоїдального сигналу до контурів управління стабілізатора визначено метод 2 з найменшим значенням похибки стабілізації (0,015 т. д.). Це точка, де динамічна похибка визначалась за різницею амплітуд сигналів після інтегратора та сигналу, що задається у точці «збивки».

Застосування методу експериментального відпрацювання є ефективним для

визначення значень основних параметрів синусоїдального сигналу щодо механічних характеристик стенду СТМ02 та учбового комплексу УК675. Відмінною особливістю цього методу є те, що відпрацювання проводиться на обладнанні, яке за своїми механічними характеристиками імітує механічні навантаження по каналам ВН та ГН реального виробу. При цьому, частота подачі сигналу залишилась незмінною та прийнята 0,8 Гц, що відповідає вимогам стабілізатора 2Е52. Характерно, що значення інших коефіцієнтів функції $U_m \cos 5,02t$ було визначено, виходячи з механічних параметрів башти (U_m), а інших – виходячи з відсутності впливу самовідводу по каналам ВН та ГН.

Відмінною особливістю розробленого методу подачі сигналу у складі технологічного стенду СТМ02 та комплексу УК675 є те, що він був запрограмований у вигляді додатку ПА351 до основної програми математичного забезпечення стабілізатора. До складу програми ПА351 входили всі намічені етапи виконання робіт. Характерно, що програма, на час досліджень працювала у ручному режимі, що значно спростило виконання експериментальних робіт та дало можливість корегування окремих коефіцієнтів.

Застосування додаткової програми алгоритмічного забезпечення ПА351 для проведення досліджень зайняло 0,2 кб обсягу пам'яті обчислювача блоку управління. В той час, коли основна програма займає 4 кб пам'яті при загальному обсязі пам'яті обчислювача 8 кб.

Особливо важливо зазначити, що при застосуванні розглянутого методу немає необхідності використовувати додатково комп'ютер на робочому місці перевірки стабілізатора.

Висновки до розділу 5

1. На підставі робіт щодо математичного моделювання та експериментального відпрацювання розроблено метод вимірювання динамічної похибки стабілізації;

2. Значення динамічної похибки стабілізації, що отримано у результаті експериментального відпрацювання, не перевищує величини, наведеної у

вимогах на стабілізатор 2Е52 (≤ 2 т.д.);

3. За позитивними результатами проведеного дослідження методика вимірювання динамічної похибки стабілізації введена до технологічного процесу виготовлення стабілізаторів озброєння.

Список літератури до розділу 5

1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БМП-2. Часть. 1. [Електронний ресурс] – Москва – 1987. – С. 247. – Retrieved from <http://armyman/info/books/id-44.html>.

2. Кудрявцев А.М Стабилизаторы вооружения 2Э36 устройство и обслуживание. [Електронний ресурс] / А.М. Кудрявцев, О.К. Уласевич, В.Н. Жеглов, В.Ю. Гумилев // Рязань, РВВДКУ(ВИ). – 2013г. – С.144. Retrieved from <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.

3. Стабилизатор 2Э26М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Альбом рисунков. – Воениздат. – Москва. – 1984.

4. Техническое описание боевой машины пехоты БМП-3. [Електронний ресурс] Москва, Воениздат. – 1988 – С. 71. Retrieved from <http://eknigi.org/voennaja-istorija/181170-bmp3-tehnicheskoe-opisanie-boevoy-mashiny-pehoty.html/>

5. Березин С.М. Комплекс вооружения БМП-3 / С.М. Березин, В.П. Конончук., А.П. Луньков, А.И. Никонов // Вестник бронетанковой техники. –1991. – № 5.

6. Патент РФ 2360208 С2 МПК F41Н 7/02, F41А 27/30. Комплекс вооружения боевой машины и стабилизатор вооружения / И.В. Степанченко, С.С. Сальников, И.А. Матвеев, Л.А. Богданова, Е.В. Власов, Г.С. Ширяев, В.В. Попов. – №2007124064/02; заявл. 10.01.2009; опубл. 27.06.2009. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/RU2360208C2/ru>.

7. Лепешинский И.Ю. (2010). Автоматические системы управления вооружением. [Електронний ресурс] / И.Ю Лепешинский, П.М. Варлаков,

Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев // Учебное пособие. Омск, Изд-во ОмГТУ. – 2013. Retrieved from mslstoryrussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.

8. Безвесільна О.М. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації / Безвесільна, О.М., Цірук, В.Г., Чепюк // Журнал «Вісник інженерної академії України». – №2, 2014. – С. 155–159.

9. Цірук В.Г. Розробка методу підвищення точності вимірювання кутової локалізації та прискорення гіростабілізованої платформи // Журнал «Технологічний аудит та резервування». – 2018. – №4 / 1 (42). – С. 11–16.

10. Cherepansra, I., The procedure for determining the normalization of random error of an informationmeasuring system with elements of artificial intelligence/ I. Cherepansra, O. Bezvesilna, A. Sazonov, S. Nechai, T. Khylichenko // Eastern-European Jornal of Enterprice Technologies. – 2017. – Vol 5, NO 9(89). – P. 58–67.

11. Simulink – Simulation and Model-Based Design, Retrieved from <http://www.mathworks.com/products/simulink>.

12. Васильев В.В. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK [Електронний ресурс] / В.В. Васильев, Л.А. Симак, А.М. Рыбникова // Учебное пособие. Национальный авиационный университет. – 2008. – С. 91. Retrieved from <https://www.twirpx.com/file/85759/>.

13. Liu, J. Signal Processing Technique for Combining Numerous MEMS Gyroscopes Based on Dynamic Conditional Correlation [Text] / J. Liu, Q. Shen, W. Qin // Micromachines. – 2015. – Vol. 6, Issue 6. – P. 684–689. doi: 10.3390/mi6060684.

14. Ting, T. O. State-of-Charge for Battery Management System via Kalman Filter [Text] / T. O. Ting, K. L. Man, C.-U. Lei, C. Lu // Engineering Letters. – 2014. – Vol. 22, Issue 2. – P. 75–82. 5. Chaudhuri, S. S. Vision Based Target-Tracking Realized with.

15. Ji, X. (2015). Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array [Text] / X. Ji // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–6. doi: 1

16. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis

vibratory gyros IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (2004), IEEE std.1431TM, 69.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Викладені у дисертаційній роботі дослідження дозволили вирішити актуальну і складну науково-технічну проблему, що має важливе значення – підвищення точностних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів (кута виставлення датчиків кутової швидкості, жорсткості, люфтів, моментів опору обертанню каналів наведення стабілізатора та інших.) та стабілізації в екстремальних умовах роботи (широкий діапазон зовнішніх вібраційних і температурних збурень).

Отримано наступні нові результати.

1. Розроблено нові методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації.

Проведений порівняльний аналіз із застосуванням методів математичного моделювання підтвердив доцільність застосування як сенсорів кутової швидкості твердотільних гіротахometrів, за рахунок більш високої смуги пропускання та підвищеної частоти інформаційного обміну, що, в свою чергу, призводить до зменшення похибок та покращення характеристик стабілізаторів.

2. Проведено розробку математичних моделей основних компонентів та каналів управління приладової системи стабілізації, що дозволило провести моделювання окремих режимів роботи стабілізатора.

3. Визначено та підтверджено математичним моделювання і експериментальними відпрацюваннями шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації, а саме:

- застосування твердотільних гіротахometrів із смугою пропускання не менше 100 Гц замість традиційних електромеханічних гіротахometrів,
- підвищення частоти інформаційного обміну з 400 Гц до 1000 Гц,
- зміни моделі побудови стабілізатора – заміна «залежної» стабілізації на «незалежну» стабілізацію з використанням у контурі управління приладу із стабілізованим полем зору.

4. Розроблено та підтверджено методом математичного моделювання правильність запропонованого методу усунення відводів вертикального та

горизонтального каналів наведення у режимі функціонування з підвищеною точністю (режим «УПР»).

5. Визначено функціональну модель цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації підвищеної точності з використанням нових чутливих елементів та приладу спостереження за об'єктами із стабілізованим полем зору. Запропонована модель побудови стабілізатора дозволить підвищити точність стабілізації та зменшити вимоги щодо вимірювання динамічної похибки стабілізації з 2 т.д. до 0,5 т.д.

6. Розроблено методи вимірювання механічних параметрів, що впливають функціонування стабілізатора:

- електронна виставка датчиків кутової швидкості, що враховує похибки їх виставки, та усуває взаємовплив каналів без застосування трудомістких ручних операцій;

- метод вимірювання моментів опору обертанню, що виконується вимірюванням струмів споживання блоку вертикального наведення та блоку горизонтального наведення та порівняння їх з граничними значеннями для кожного з каналів;

- метод вимірювання жорсткості вертикального та горизонтального каналів наведення;

7. Розроблено та впроваджено у виробництво метод вимірювання динамічної похибки стабілізації, що визначається за результатами відпрацювання стабілізатором синусоїдальний сигналу $A=2,5^\circ \sin \omega t$, що дозволяє:

- проводити вимірювання на етапах налаштування, пред'явницьких та приймально-здавальних випробувань приладової системи стабілізації без виконання трудомістких робіт випробувань в умовах полігону;

- підвищити якість перевірок одного з основних технічних параметрів приладової системи – точності стабілізації.

Розроблений метод не потребує додаткової доробки матеріальної частини стабілізатора та реалізується за рахунок зміни програмно-алгоритмічного забезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лепешинский И.Ю. Автоматические системы управления вооружением / И.Ю. Лепешинский, П.М. Варлаков, Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев [Електронний ресурс] // Учебное пособие. – Омск. – 2010. Retrieved from <http://mslstaryrussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773>.
2. Безвесільна О.М. Наукові, технологічні, організаційні та впроваджувальні основи створення нового комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих машин / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук // Монографія. – НПО «Пріоритети», Київ з грифом ЖДТУ. – 2015. – С 176.
3. Безвесільна О.М. Оптимізація, ідентифікація, алгоритмічна обробка параметрів чутливих елементів стабілізатора легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, С.П. Маляров, Л.О. Чепюк // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2015. – С. 217.
4. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння. / О.М. Безвесільна, В.П. Квасніков, В.Г. Цірук, В.В. Чиковані. // Монографія. – НПО «Пріоритети», Київ: ЖДТУ. – 2014. – С.176.
5. Безвесільна О.М. Методи оптимізації цільової функції та ідентифікації характеристик прецизійних навігаційних систем / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, Ю.О. Подчашинський // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – С.201.
6. Безвесільна О.М. Системи керування навігаційних систем рухомих об'єктів / О.М. Безвесільна, Ю.В. Киричук, С.С. Ткаченко // Монографія. – Житомир: ЖДТУ. – 2010. – С.174.
7. Цірук В.Г. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасніков, Л.О. Чепюк // Вісник Інженерної академії України. – № 2, 2014р. – С. 155 – 159.
8. Цірук В.Г. Наукові, технологічні, організаційні та впроваджувальні основи створення нового комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих

машин / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук. Монографія. // НПО «Пріоритети» – Київ з грифом ЖДТУ. – 2015. – С.176.

9. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Боевая машина пехоты БМП-2. Часть. 1. [Електроний ресурс] /– 1987. – Retrieved from <http://armyman/info/books/id-44.html>.

10. Безвесільна О.М. Наукові дослідження в галузі вимірювання механічних величин: підручник / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, Г.С. Тимчик // – Житомир: ЖДТУ. – 2011. – С.876.

11. Безвесільна О.М. Особливості цільових задач, що вирішуються рухомими об'єктами та їх вплив на склад комплексів орієнтації і навігації /О.М. Безвесільна // Міжнародний науковий журнал «Технологічні комплекси» – № 1(7), 2013р. – С. 51 – 53.

12. Левин И. Я. Справочник конструктора точных приборов./ Левин И. Я. // Москва, Оборонгиз. – 1962. – С.727.

13. Цірук В.Г. Компенсація похибок датчиків первинної інформації /В.Г. Цірук // VII Міжнародна науково-технічна конференція "Гіротехнології, навігація керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки", 23,24 квітня 2009 р.: Збірка доповідей. Ч1/К.: НТУУ "КПІ".– 2009.- С.36–42.

14. Бабаев А.А. Стабилизация оптических приборов / А.А. Бабаев // Л.:Машиностроение. – 1975. – С.158.

15. Безвесільна О.М. Принципи побудови системи для вимірювання механічних величин на основі двомірної інформації / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський // Вісник Інженерної академії України. – №3,1974, 2009. – С.52-55.

16. Лепешинский И.Ю. Автоматические системы управления вооружением [Електроний ресурс] / И.Ю. Лепешинский, П.М. Варлаков, Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев // Учебное пособие. – Омск. – 2010. Retrieved from <http://mslstoryrussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773>.

17. Безвесільна О.М. Підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки// О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В Ільченко, Ю.В.

Киричук // XIV Міжнародна науково-практична конференція «Наукова думка інформаційного віку 2018» Польща, Пшемишль. – 07–15.03.2018. – С. 3–8.

18. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння. /Безвесільна О.М. В.П. Квасніков, В.Г. Цірук, В.В. Чиковані // Монографія. – НПО «Пріоритети». – Київ, ЖДТУ.– 2014. – С. 176.

19. Гиротакметри ГТ46-01. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zelaz.ru/girotahometr-gt46-gt46-01.html>.

20. Безвесільна О.М. Математична модель та технічні характеристики гіротакметра ГТ46 / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, Д.С. Козюков // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція «Технічні науки на сучасному етапі» (присвячена Дню науки). – Житомир. – 19.05.2018. – С. 92-93.

21. КВГ, ЦКВГ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zelaz.ru/koriolisovyy-vibracionnyy-giroskop-kvg-ckvg.htm>.

22. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (2004), IEEE std.1431™, 69.

23. Волоконные датчики вращения ВГ***. Сводные ТУ. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.fizoptika.ru/docs/fizoptika_doc105.pdf.

24. G20 to axis MEMS rate gyro. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.gladiatortechnologies.com>.

25. Сущенко О.А. Обзор современного состояния микроэлектромеханических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О.А. Сущенко, С.В. Карасев // Електроніка та системи управління. – №1(27), 2011. – С. 103-108.

26. Liu, J. Signal Processing Technique for Combining Numerous MEMS Gyroscopes Based on Dynamic Conditional Correlation [Text] / J. Liu, Q. Shen, W. Qin // Micromachines. – 2015. – Vol. 6, Issue 6. – P. 684–689. doi: 10.3390/mi6060684.

27. Ji, X. Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array [Text] / X. Ji // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–6. doi: 1.

28. Юферов Ф.М. Электрические двигатели автоматических устройств. / Ф.М. Юферов // «Высшая школа». – Москва. –1976. – С.416.
29. Электрические машины автоматических устройств / М.М Кацман // Инфа-М. – Москва. – 2002. – С.264.
30. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БМП-2. Часть. 1. [Электронный ресурс] Москва. – 1987. – Режим доступа: <http://armyman/info/books/id-44.html>.
31. Кудрявцев А.М.. Электрооборудование бронетанковой техники. Стабилизаторы вооружения 2Э36: устройство и обслуживание [Электронный ресурс] / А.М. Кудрявцев, О.К. Уласевич, В.Н. Жеглов, В.Ю. Гумилев // Учебное пособие. Рязань. – 2013г. – С. 144. Режим доступа: <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.
32. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1 и 2. БМП-3. [Электронный ресурс] – Воениздат. МО Москва – 1998. – Режим доступа: <https://mil.in.ua/forum/viewtopic.php?t=893>.
33. Терехин В.В. Основы моделирования в MATLAB. Часть 2. Simulink / В.В. Терехин // Учебное пособие. – Новокузнецк. РИО НФИ Кем ГУ. – 2004 – С.376.
34. Васильев В.В. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK /В.В. Васильев, Л.А. Симак, А.М. Рыбникова// Учебное пособие. – Киев: Национальный авиационный университет. – 2008. – С. 91.
35. Бусленко Н.Г. Моделирование сложных систем / Н.Г.Бусленко //- М.: Наука. – 1978.- С. 400.
36. Елисеев, А.Д. Исследование быстродействующего привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения со статическим преобразователем / А.Д. Елисеев, Б.В. Новоселов // Оборонная техника.- 2011. – №8. – С. 24–29.
37. Елисеев, А.Д. Математическая модель статического преобразователя стабилизатора танкового вооружения как нелинейной импульсной системы / А.Д.

Елисеев, В.А. Шаталов // Вопросы оборонной техники. Серия IX. – 2012. – №6(258).

38. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учебник для ВУЗов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев // М.: Высшая школа. – 2001. – С. 343.

39. Егоренко Д. Л. Основы математического моделирования Построение и анализ моделей с примерами на языке Matlab / Д. Л. Егоренко, А.Л. Фратков, В.Ю. Харламов. Под. ред. д-ра техн. наук А.Л. Фраткова // Учеб. Пособие. СПб.: БГТУ. – 1994.

40. Кочергин В.В. Следящие системы с двигателем постоянного тока / В.В. Кочергин // Л.: Энергоатомиздат. – 1988. – С. 168.

41. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов // М.: Высш. шк. – 1994. – С. 318.

42. Семёнов А.С. Математическое моделирование режимов работы двигателя постоянного тока в среде MATLAB / А.С. Семёнов, В.М. Хубиева, М.Н. Петрова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-3. – С. 523-528; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39249> (дата обращения: 20.04.2020).

43. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов // М.: Наука. – 1975. – С. 768.

44. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов // Физматлит, Москва. – 2005. – С. 320.

45. Елисеев А.Д. Модернизация привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения / А.Д. Елисеев // Вооружение. Технология. Безопасность. Управление. Материалы III научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых. В 3 ч. Часть 1. Ковров. – 2008. – С.157–161.

46. Шарма Д.Н. Уравнения в частных производных для инженеров / Д.Н. Шарма, К. Синг // Техносфера, Москва. – 2002. – С. 320.

47. Ханукаев Ю.И. О кватернионах. Конечные перемещения твердого тела и точки.[Электронный ресурс] / Ю.И. Ханукаев / Электронный журнал

«Исследовано в России». – С. 338–346. <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2002/033.pdf>.

48. Мелешко В.В. Методические указания к домашним заданиям по курсу "Теория и расчет приборов и систем" [Электронный ресурс]. / В.В. Мелешко // – Киев: НТУУ «КПИ» – 2011. – С. 81.

49. Веселов В.А. Гирскопические измерительные приборы и устройства. /В.А. Веселов, Р.Н. Гробовой, О.С. Ипатов, В.Г. Кузнецов, В.И. Медведев / Учебное пособие. Балтийский государственный технический университет. – 2003. – С. 122.

50. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая/Л. : Энергоатом. –1990. – С. 288.

51. Величко Т.И., Родькин Д.И. Теория электропривода. Часть 1.Механика и характеристики двигателей / Т.И. Величко, Д.И. Родькин // КППИ, Кременчуг. –1999. – С. 237.

52. Кардонов Г.А. Курс лекций по электроприводу [Электронный ресурс] / Г.А. Кардонов // Государственный институт точной механики и оптики, Санкт – Петербург. – 2003. – Режим доступа: ets.ifmo.ru/kardonov/privod/privod.htm.

53. Донбасский государственный технический университет / УЧЕБ_ПОСОБИЕ_часть_2 / редак / 5-6 МЕХАНИЧ_ПП-измен_A5.doc <https://studfile.net/preview/5060890/page:2/>

54. Московский государственный открытый университет им. В. С. Черномырдина. Электрический привод / Главы по ЭП / 10_Глава 8.doc <https://studfile.net/preview/2263789/page:3/>.

55. Головки Д. В. Метрологія та основи вимірювань / Д. В. Головки, К. Г. Рого, Ю. О. Скрипник // Либідь. – Київ. – 2001. – С. 408.

56. Одинцов А.А. Теория и расчет гироскопических приборов / А.А. Одинцов // Учебное пособие., Высшая школа., Главное издательство. – Киев. – 1985. – С. 392.

57. Александрова А.Д. Индикаторные гироскопические платформы / А.Д. Александров, Е.А. Правоторов, В.Ф. Рафельсон, М.П. Фельдман // Машиностроение. – 1979. – С. 239.
58. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння [текст]: монографія / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасников, В.В. Чіковані // ЖДТУ. – Київ. – 2014. – С. 176.
59. Nasiri S. A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.invensense.com/shared/pdf/MemsGyroComp.pdf>.
60. Техническое описание боевой машины пехоты БМП-3. [Электронный ресурс] Москва, Воениздат. – 1988 – С. 71. Retrieved from <http://eknigi.org/voennaja-istorija/181170-bmp3-tehnicheskoe-opisanie-boevoy-mashiny-pehoty.html/>.
61. Ashish Tewari Modern Control Design. With MATLAB and SIMULINK. Indian Institute of Technology, Kanpur, India. John Wiley & Sons Ltd Baffins Lane, Chichester, West Sussex, PO19 1UD, England. P-503.
62. Лазарева Т. Я. Основы теории автоматического управления / Т.Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов // Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – С. 352.
63. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации / В.А. Бесекерский, Е.А. Фабрикант // Судостроитель, Л. – 1968. – С. 348.
64. Березин С.М. Комплекс вооружения БМП-3 / С.М. Березин, В.П. Конончук, А.П. Луньков, А.И. Никонов // Вестник бронетанковой техники. – № 5. – 1991.
65. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский // Вища школа. – Киев. – 1983. – С. 455.
66. Кудрявцев А.М. Стабилизаторы вооружения 2Э36 устройство и обслуживание. [Электронный ресурс] / А.М. Кудрявцев, О.К. Уласевич, В.Н. Жеглов, В.Ю. Гумилев // Рязань, РВВДКУ(ВИ). – 2013г. – С.144. Retrieved from

<http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.

67. Стабилизатор 2Э26М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Альбом рисунков. – Воениздат. – Москва. – 1984.

68. Патент РФ 2360208 С2 МПК F41Н 7/02, F41А 27/30. Комплекс вооружения боевой машины и стабилизатор вооружения / И.В. Степанченко, С.С. Сальников, И.А. Матвеев, Л.А. Богданова, Е.В. Власов, Г.С. Ширяев, В.В. Попов. – №2007124064/02; заявл. 10.01.2009; опубл. 27.06.2009. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/RU2360208C2/ru>.

69. Лепешинский И.Ю. (2010). Автоматические системы управления вооружением. [Электронный ресурс] / И.Ю. Лепешинский, П.М. Варлаков, Д.Н. Захаров, О.И. Чикирев // Учебное пособие. Омск, Изд-во ОмГТУ. – 2013. Retrieved from mslstoryrussia.ru/forum/dowland/life.php?id=36773.

70. Безвесільна О.М. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації / Безвесільна, О.М., Цірук, В.Г., Чепюк // Журнал «Вісник інженерної академії України». – №2, 2014. – С. 155–159.

71. Цірук В.Г. Розробка методу підвищення точності вимірювання кутової локалізації та прискорення гіростабілізованої платформи // Журнал «Технологічний аудит та резервування». – 2018. – №4 / 1 (42). – С. 11–16.

72. Cherepansra, I., The procedure for determining the normalization of random error of an informationmeasuring system with elements of artificial intelligence/ I. Cherepansra, O. Bezvesilna, A. Sazonov, S. Nechai, T. Khylichenko // Eastern-European Jornal of Enterprice Technologies. – 2017. – Vol 5, NO 9(89). – P. 58–67.

73. Simulink – Simulation and Model-Based Design, Retrieved from <http://www.mathworks.com/products/simulink>.

74. Ting, T. O. State-of-Charge for Battery Management System via Kalman Filter [Text] / T. O. Ting, K. L. Man, C.-U. Lei, C. Lu // Engineering Letters. – 2014. – Vol. 22, Issue 2. – P. 75–82. 5. Chaudhuri, S. S. Vision Based Target-Tracking Realized with.

75. Ji, X. (2015). Research on Signal Processing of MEMS Gyro Array [Text]
/ X. Ji // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–6. doi: 1

ДОДАТКИ

Додаток А

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ»
TheStateConcernUKROBORONPROM

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
“НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ
ОБ’ЄДНАННЯ
“КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД АВТОМАТИКИ”



PUBLIC JOINT STOCK COMPANY
RESEARCH-AND-PRODUCTION
ASSOCIATION
“KYIV AUTOMATICS PLANT”

вул. Старокіївська, 10, м. Київ, 04116 Україна
Тел./факс: +38044-236-62-75

10 Starokyivskastr., Kyiv, 04116, Ukraine
Tel/fax: +38044-236-62-75

http://www.kza.com.ua E-mail: kza@kza.com.ua http://www.kza.com.ua E-mail: kza@kza.com.ua

вих. № _____ на № _____ від _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова Правління

 С.П. Маляров
« _____ » 2020 р.

АКТ

впровадження основних положень дисертаційної роботи

« Методи та засоби підвищення точностних характеристик приладової системи
вимірювання механічних параметрів та стабілізації»,

що представлена на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин

Ми, що нижче підписалися, начальник конструкторсько-технологічного управління Возняковський А.О., начальник СКБ Петренко О.В., секретар науково-технічної ради Мірошник С.В., склали дійсний акт про те, що результати наукових досліджень за темою «Методи та засоби підвищення точностних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації» пошукача Ільченко Миколи Васильовича, які викладені у численних фахових статтях, а також були презентовані на наукових конференціях, узагальнені у дисертаційній роботі, дійсно застосовувались при дослідженні шляхів підвищення точності стабілізації, швидкодії і вимірювання динамічної похибки приладового комплексу стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки та в подальшому були впроваджені у розробках згідно тематики ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» за участю автора Ільченко М.В.

Акт не є підставою до взаємних фінансових розрахунків.

Начальник КТУ



А.О. Возняковський

Начальник СКБ



О.В. Петренко

Секретар НТР



С. В. Мірошник



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37; тел. (+38 044) 204-82-82 тел./факс (+38 044) 204-97-88
<http://www.kpi.ua> e-mail: mail@kpi.ua ЄДРПОУ 02070921№ _____
на № _____ від _____**ДОВІДКА**

**про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи
Ільченко Миколи Васильовича
на тему «Методи та засоби підвищення точнісних характеристик
приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації»**

Основні положення та теоретичні обґрунтування кандидатської дисертаційної роботи Ільченко М. В. використовуються викладачами кафедри приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у навчальному процесі при проведенні лекційних, лабораторних та практичних занять із навчальних дисциплін «Перетворювачі фізичних величин» для бакалаврів, «Основи наукових досліджень» для магістрів.

Впроваджено такі результати дисертації:

- шляхи підвищення точності цифрової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;
- підвищення точності стабілізації за рахунок зміни принципу побудови стабілізаторів с «залежної» на «незалежну» стабілізацію;
- вимірювання динамічної похибки системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації;

Використання наукових здобутків Ільченко М.В. сприяє підвищенню якості підготовки студентів бакалаврів та магістрантів кафедри приладобудування зі спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Проректор з навчальної роботи



А.А. Мельниченко

Додаток Б

Фото стабілізатора з Коріолісовими вібраційними гіроскопами (КВГ)

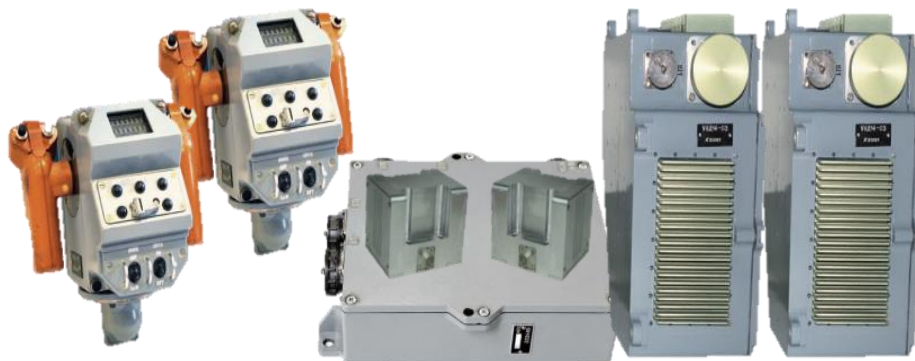


Фото стабілізатора озброєння СВУ – 500 – 7Ц -03 з Коріолісовими вібраційними гіроскопами КВГ, представленого на Міжнародній спеціалізованій виставці “Зброя та безпека”



**Фото Коріолісових вібраційних гіроскопів встановлених при випробуваннях
у різних виробках**

Коріолісови вібраційні гіроскопи, які встановлені у складі стабілізатора у
БТР-3ДА



Коріолісови вібраційні гіроскопи, які встановлені у складі стабілізатора у БМП-2

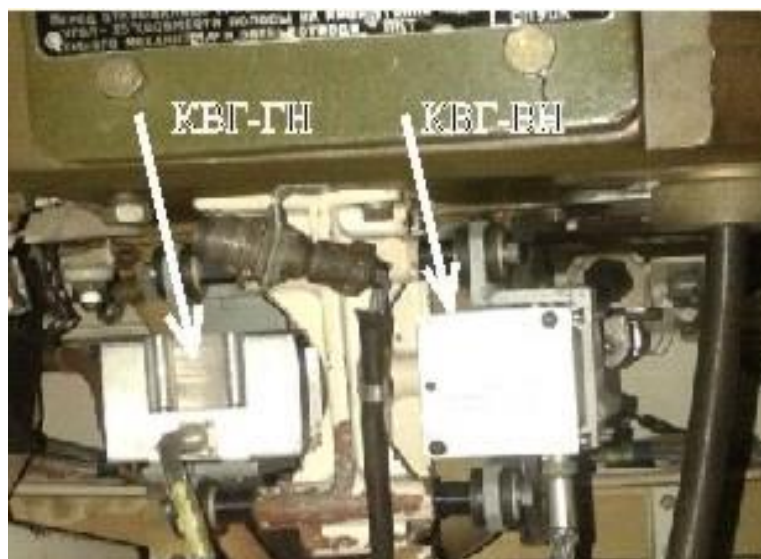


Фото статей, присвячених приладовому комплексу стабілізації



КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІК

ЗАСНОВАНА 21 КВІТНЯ 1927 РОКУ

ВИХОДИТЬ ЩОТИЖНЯ

ГАЗЕТА НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Безкоштовно

16 червня 2016 року

№21 (3160)

Стабілізатор озброєння для броньованої техніки На здобуття Державної премії України

У умовах неоголошеної війни на сході України надзвичайно актуальними є роботи, присвячені підвищенню обороноздатності держави. Одна з таких – новий приладовий комплекс стабілізатора озброєння (КС озброєння) легкої броньованої техніки СВУ-500 у різних варіантах виконання для різних типів легкої броньованої техніки (СВУ-500, СВУ-500-01, СВУ-500-3Ц, СВУ-500-4Ц, СВУ-500-4Ц-01, СВУ-500-10Р, СВУ-500-3Ц-01), призначений для стабілізованого наведення і супроводу в горизонтальній та вертикальній площинах наземних, повітряних і надводних цілей для ефективної стрільби з місця, на ходу і на плаву. Роботу висунуто на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки 2016 р.

Використовуються такі комплекси в системах управління вогнем бойового модуля "Шквал", виробів на бронетранспортерах БТР 3Е, бойових машинах піхоти БМП ІМ (СВУ-500-3Ц), а також бойових модулів "Штурм" і "Парус" бронетранспортерів БТРІ 3Е та бойових машин піхоти БМП 4 (СВУ-500-4Ц).

До складу творчого колективу, який розробив цей комплекс, входять генеральний директор ПАТ "НВО "Київський завод автоматики ім. Г.І.Петровського" заслужений машинобудівник України, к.т.н. С.П.Малюков, головний інженер цього підприємства заслужений машинобудівник України, к.т.н. В.Г.Цірук та його провідні співробітники О.І.Клименко, А.І.Пономаренко й М.В.Ільченко; професор кафедри приладобудування НТУУ "КПІ" заслужений діяч науки і техніки України, д.т.н. О.М.Безвеськіна та заслужений діяч науки і техніки України, д.т.н., професор, академік АПН України, президент Відкритого міжнародного

університету розвитку людини "Україна" професор П.М.Таланчук.

Розробка нового КС озброєння дозволила замінити комплекси такого призначення, які вироблялися за радянських часів на Ковровському електромеханічному заводі в Російській Федерації й безнадійно застаріли не лише за своєю конструкцією та елементною базою, але й, передусім, за своїми тактико-технічними характеристиками.

у виробництво і постановка їх на озброєння дозволила мінімізувати закордонні постачання відповідних складників. Вартість такої техніки є у два з половиною рази меншою за вартість закордонних аналогів при одній кращих ТТХ. Варто зауважити, що на момент, коли готувався цей матеріал, у зоні АТО вже використовувалося понад 100 нових комплексів стабілізаторів озброєння на БТР-4. Не дивно, з початку 2000-х років – часу, коли почалася робота над розробкою і впровадженням комплексів, обсяги виробництва цієї продукції зросли майже у 85 разів: наприклад, у 2002 р. цей показник склав 0,7 млн грн, а в 2016 р. – 85,3 млн грн. Це, справді, визначний внесок не лише в укріплення обороноздатності України, але й у її економіку!

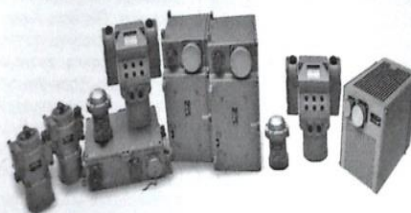
Додамо, що нові КС експортувалися до Судану, М'янми, Іраку, а нині постачаються до Таїланду.

Результати, отримані авторами роботи, забезпечили Україні можливість стати фундатором нового напрямку у випуску нових ефективних приладових КС легкої броньованої техніки.

Насамкінець слід зауважити, що новизну та конкурентоспроможність технічних рішень, реалізованих у КС, захищено 17 патентами. За даною тематикою захищено 6 докторських та 12 кандидатських дисертацій. Основні науково-технічні результати роботи опубліковано в 7 монографіях та 9 підручниках, 285 публікаціях у наукових фахових виданнях (у тому числі у 65 міжнародних), причому загальна кількість посилань на публікації авторів складає 118 (згідно з базою даних Google Scholar), h-індекс = 11.

Висування роботи на здобуття Державної премії України підтримала Вчена рада НТУУ "КПІ".

Інф. "КПІ"



Модернізований цифровий стабілізатор озброєння СВУ-500-4Ц ЮКАІ.461314.001-04

В українських розробках застосовано нові перспективні компоненти елементної бази та датчики інформації. Тож за тактичними характеристиками нові приладові КС поліпшують бойові можливості легкої броньованої техніки за рахунок точнішого наведення на ціль і стабілізації, а також полегшення управління блоком озброєння, адже комплекси є простими в експлуатації та обслуговуванні. Понад те, вони можуть застосовуватися не лише у військовій, але й у цивільній галузях – наприклад, у пересувних лабораторіях різного призначення.

Крім того, завдяки використанню компонентів і вузлів, які здебільшого вироблено в Україні, впровадження нових приладових КС

ОПК

ВІЙСЬКУ ПОТРІБЕН СУЧАСНИЙ СТАБІЛІЗАТОР ОЗБРОЄННЯ

На публічному акціонерному товаристві «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматички ім. Г.І. Петровського» розробили стабілізатор для модернізації БМП-2

Українська «оборонка» добре знає у світі завдяки якості та надійності своєї продукції. А вітчизняні виробники зброї діють конкурентно зі своїми колегами з Європи та Азії. Одним з таких прикладів є розробки публічного акціонерного товариства «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматички ім. Г.І. Петровського», на сталочинному підприємстві ввійшли в життя, де використано принципово нові технічні рішення. Завдяки цьому тепер у Києві виробляють одні з найкращих надійних і досконалих систем стабілізації озброєння і устаткування для бронетехніки.

Стабілізатори озброєння, про які далі йтиметься, застосовуються в системах управління вогнем різних бойових модулів для безпечної звазки бронетехніки. Такі стабілізатори є на всіх видах бронетехніки, що сьогодні переобладнають на озброєння в нашому війську. Відома кажучи — це розробки ще минулого сторіння, які вже морально застаріли.

Принципово нові стабілізатори, які виготовляють на ПАТ «НВО «Київський завод автоматички ім. Г.І. Петровського», можуть застосовуватися при модернізації наявних та розробці нових легкоброньованих бойових машин БТР, БМП, БМД тощо. Так, розробки Київського заводу автоматички застосовуються на такі зразки бронетехніки: вітчизняного виробництва, як БТР-3Б1 та БТР-4, і добре зарекомендували себе в бойових умовах.

Для модернізації зразків бронетехніки, які вже тривалий час є на озброєнні війська, заводчани розробили стабілізатор СВУ-500-7Ц. Він призначений для БМП-2 і має забезпечити стабілізацію наведення і стрільби у горизонтальній і вертикальній площинах наведення, протривати і надати ціль. СВУ-500-7Ц має забезпечити ефективність стрільби з миски, на ходу і на плаву.

Стабілізатор СВУ-500-7Ц належить до останнього покоління і відрізняється зовнішнім виглядом і цифровим виглядом.

Виготовлення нового стабілізатора для БМП-2 вже перебуває на завершальному етапі. Попередні тестування та бойові стрільби показали його високу ефективність. Наказником-оператором, який керує системою, є цей пристрій, відзначено, що він простий у користуванні. За його словами, цифровий стабілізатор дозволяє стріляти акуратніше, а миску зайняти в два рази менше, відповідно, і протривати довше.

Найкращим параметром стабілізатора здійснюється оператором безпосередньо від пульта управління стрільбою без необхідності регулювальними елементами на блоках управління.

— Інформація про режим роботи та стан стабілізатора відображається на цифровому дисплеї пульту. Це дуже зручно, оскільки в сучасному бою виграє той, хто раніше бачить ціль і швидше здійснює постріл, — наголошує голова правління Сергій Миллер.

Як чутливий елемент у стабілізаторі застосовано карісований вібраційний гіроскоп (КВГ). Принцип його дії базується на інерційних властивостях пружних зв'язок, що виникають у резонансних частотах. Завдяки датчику кутової швидкості точні характеристики стабілізатора озброєння були значно покращені, зокрема щодо точності та стабільності стрільби, а також швидкості наведення.

Систему стабілізації озброєння та обладнання для бронетехніки Київського заводу виготовили інженери Г.І. Петровського є досвідчені й досконалі, що доводить практика бойового застосування. А за деякими попередніми даними, вони є одними з кращих у Східній Європі. Стабілізатори озброєння попередніх поколінь застосовувалися в системах управління вогнем бойових модулів «Шквал» виробу БМТ-1М (СВУ-500-3Ц) і бойових модулів «Штурм» і «Парус» виробів БТР-3Б1 (СВУ-500-4Ц) і БТР-4 (СВУ-500-4Ц-01) відповідно. Також вони застосовувалися для стабілізації і стабілізацією наведення теплових оптико-тепловізійних систем управління вогнем у складі виробу «Гроза» для катери.



Голова правління ПАТ «НВО «Київський завод автоматички ім. Г.І. Петровського», керівний інженер-оператор Сергій Миллер

Використання карісового вібраційного гіроскопа отримало розширення діапазона швидкостей у режимі ПАЗ (для стрільби по повітряним і швидкоманеврним наведенням ціль), АБТ (для стрільби по наведенню і наведенню ціль), ЦУ (для вогневого пострілу на ціль, визначення координат). Виведені нові режими УПР (для забезпечення стрільби протиповітряним ракетним управлінням наведення безпосередньо зі стабілізатора) та АЦ (якщо траєкторія контрастної ціль). Також може автоматично здійснюватися діагностика стану блоку стабілізатора на різних режимах основної роботи. Надійність наведення на ціль знизилася втричі (до 0,3 т.д.), середню протривку стабілізації — удвічі (до 0,5 т.д.).

— Оскільки в карісованому вібраційному гіроскопі не використовуються обертові частини та підшипники, шуми, імпульсний строк стабілізатора озброєння обмежується лише терміном служби датчика навігації з широким діапазоном частот. З вилученням з складу стабілізатора перетворювача напруги, конденсаторного провідника та блоку фільтра напруги виробу знизилася його вага — до 65 кг, — наголошує голова правління Віктор Царук.

Головне, що застосування датчиків стабілізатора у складі легкої бронетехніки дозволяє підвищити її тактико-технічні характеристики. Адже за тактичними характеристиками стабілізатор розширює бойові можливості машини шляхом підвищення наведення та стабілізації на ціль, покращує та збільшує можливості вогню в управлінні вогнем. Це поєднання параметрів дає на ту ж ціль після здійснення пострілу. Згідно з твердженнями військових фахівців, практика, бойові етапи переобладнання



СВУ-500-7Ц дозволяє здійснювати стабілізацію наведення і стрільби, у тому числі і в горизонтальній площині наведення, протривати і надати ціль

Список публікацій здобувача за темою дисертації

За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, із них 6 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті у інших виданнях, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Список публікацій здобувача:

Статті у фахових виданнях:

1. Bezvesilna O. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers / O.Bezvesilna, O.Petrenko, V.Halytskyi, M.Ilchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system. – Kharkiv. – 2020. – №1/9(103). – PP. 39 – 45.

2. Петренко О.В. Виконавчі елементи та датчики системи керування хвилею Коріолісового вібраційного гіроскопа / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». — Луцький національний технічний університет, Луцьк. — 2019. — №14. — С. 103 – 108.

3. Безвесільна О.М. Інтегруючий режим вібраційного гіроскопа з металевим циліндричним ротором / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького технічного університету. Технічні науки — Хмельницький. — 2019. — №4(275). — С. 169 – 175.

4. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, С.О. Нечай // Вісник інженерної академії України. — 2017. — №4. — С. 89 – 92.

5. Безвесільна О.М. Шляхи підвищення точності приладових стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Хмельницького

національного університету. Технічні науки – Хмельницький національний університет, Хмельницький. – 2019. – №3(273). – С. 158 – 163.

6. Безвесільна О.М. Вибір робочого діапазону кутів тахометра для виробів легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2019. – №2(69). – С. 21 – 25.

Інші наукові видання:

7. Безвесільна О.М. Оцінка впливу конструкції кронштейну для установки приладів ГТ46, ГТ46-01 на їх вихідні сигнали / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – №7 (71) – С. 1– 5.

8. Безвесільна О.М. Дослідження можливості підвищення рівномірності вихідної характеристики тахометра / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – № 8 (72).– С. 149–152.

9. Безвесільна О.М. Визначення смуги пропускання електромеханічних гіротахометрів / О.М. Безвесільна О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Науковий журнал «Молодий вчений». – 2019. – № 9(73). – С. 219–226.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

10. Безвесільна О.М. Підвищення точності стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко, Ю.В. Киричук // XIV Міжнар. наук.-прак. конф. «Наукова думка інформаційного віку 2018» (Польща, Пшемишль. – 07–15.03.2018). – С. 3–8.

11. Безвесільна О.М. Призначення та основні характеристики стабілізатора / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, М.В. Ільченко // Всеукраїнська наук.-прак. on-line конф. «Технічні науки на сучасному етапі», (Україна, Житомир. – 16-18.05.2018). – С. 107,108;

12. Безвесільна О.М. Усунення взаємовпливу каналів вертикального та горизонтального наведення в виробках легкої броньованої техніки / О.М.

Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // XII Міжнар. наук.-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси 2019» (Україна, Київ. – 21–22 травня 2019). – С. 262 – 264;

13. Безвесільна О.М. Заміна електроприводів наведення у БМП-1 на електропривод СВУ-500-10Р / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // I Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси», (Україна, Черкаси, 29-31 травня 2019). – С. 92 – 94;

14. Безвесільна О.М. Випробування енкодера для використання у гіроскопічних приладах / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнар. наук. інтернет-конф. «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 40), (Україна, Тернопіль, 09.07.2019). – С. 767 – 769;

15. Безвесільна О.М. Розширення відмов стабілізаторів / О.М. Безвесільна, О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Наук. практ. конф. «Сучасні світові тенденції розвитку науки, технологій та інновацій». (Україна, Ужгород, 28–29 червня 2019). – С. 44 – 49.

16. Петренко О.В. Автоматичне налаштування стабілізаторів / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // Міжнар. наук.-практ. конф. «Die Relevanz und die Neuheit der modernen wissenschaftlichen Studien». Частина 3. (Австрія, Відень, 23 серпня 2019). – С. 44 – 46.

17. Петренко О.В. Модернізація та продовження строку служби комплексу приладів управління / О.В. Петренко, М.В. Ільченко // VII Міжнар. конф. «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», (Україна, Київ, 9–10 жовтня 2019). – С. 570 – 572.